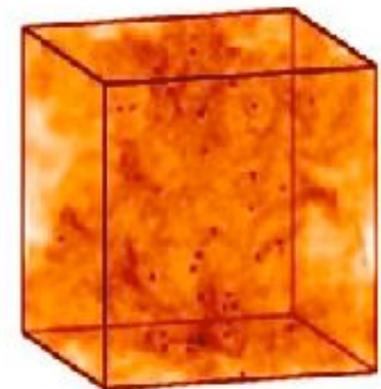
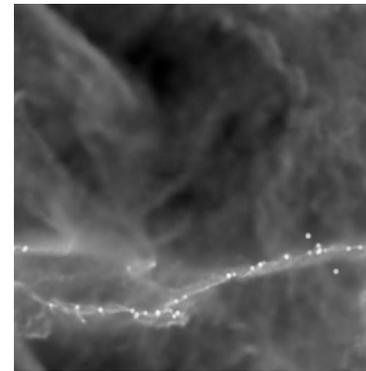
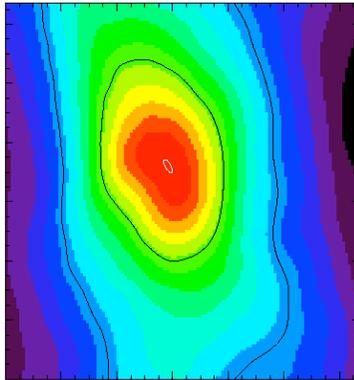




# Die Geburt der Sterne



**Ralf Klessen**

Zentrum für Astronomie Heidelberg



# Übersicht

WAS?

- Was sind Sterne?

WO und WANN?

- Wo und wann bilden sich Sterne?

WIE?

- Wie bilden sich Sterne?



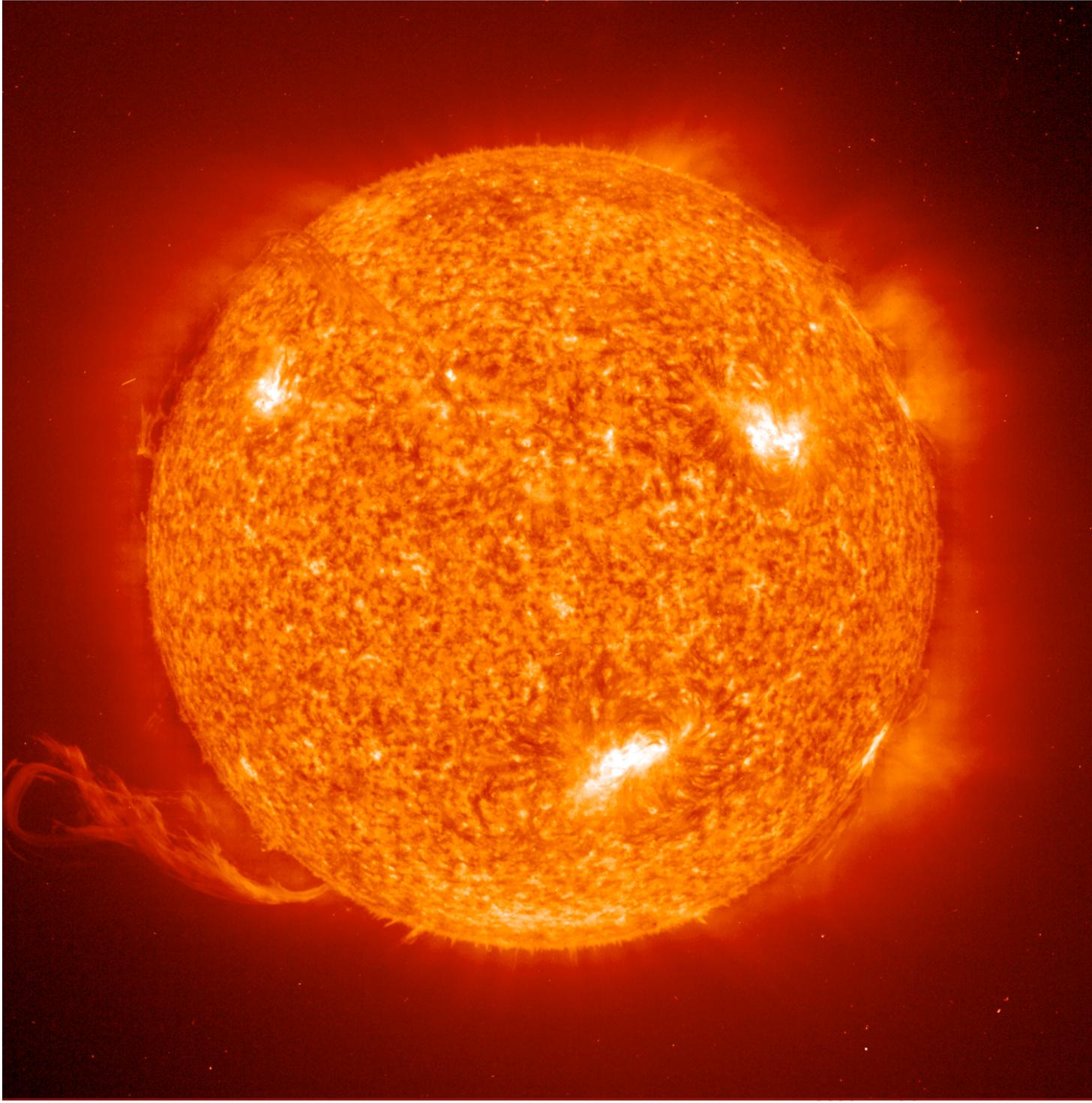
Theorie der turbulenten  
Sternentstehung

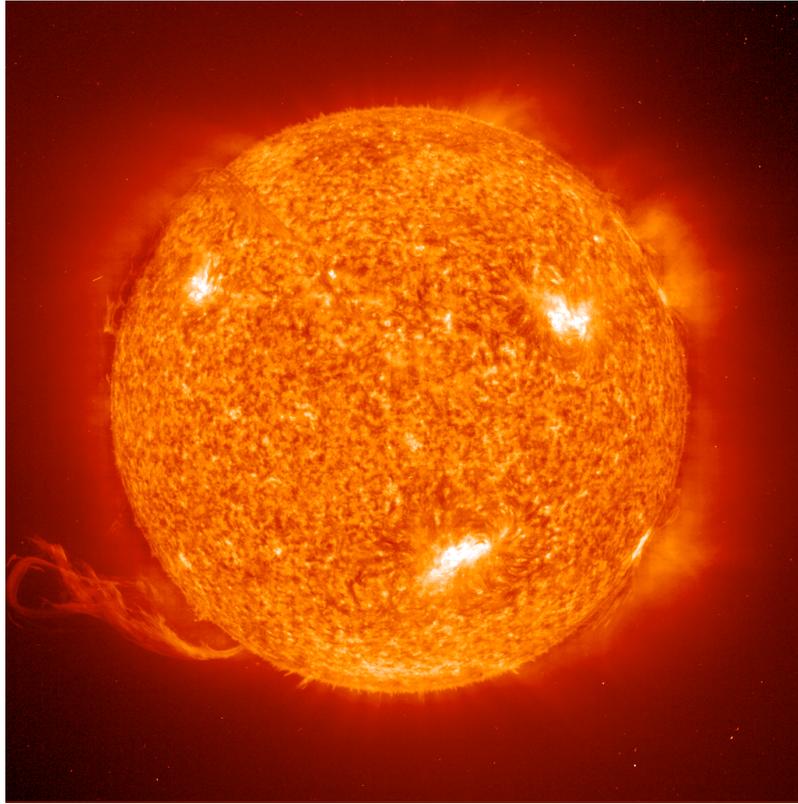
Phänomenologie

Theorie

WAS?

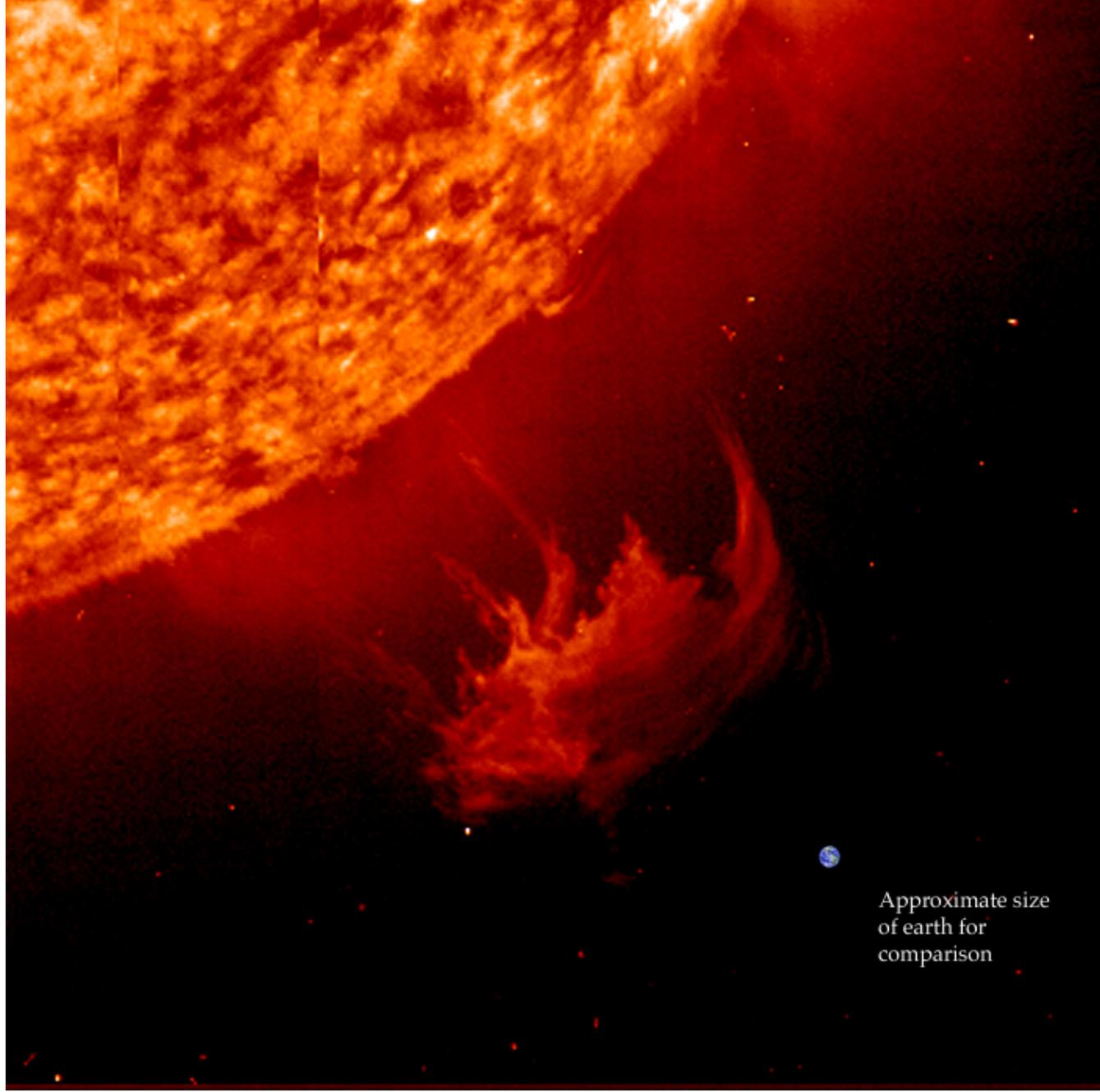
Unsere Sonne





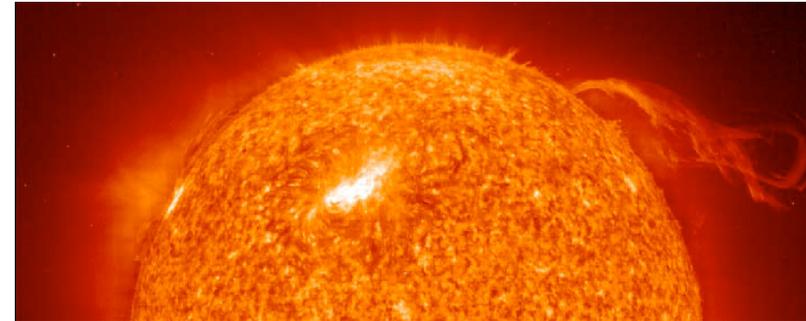
## Unsere Sonne in verschiedenen Aktivitätsphasen

# Größenvergleich: Sonne - Erde



# Sterne: die Sonne

Eigenschaften der Sterne  
(Stellare Zustandsgrößen):



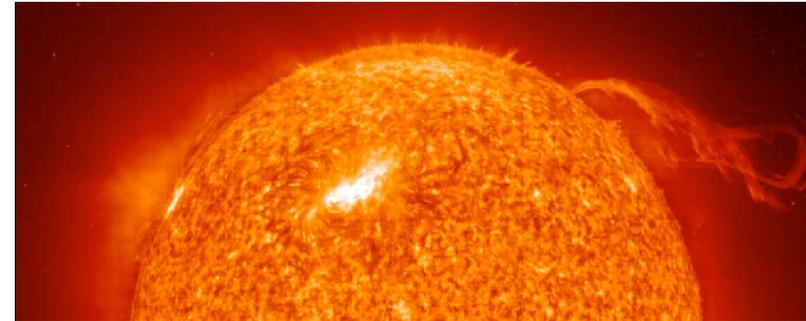
**Unsere Sonne ☉ als Referenzstern**

Radius	$R_{\odot}$	696 000 km
Masse	$M_{\odot}$	$1,989 \times 10^{30}$ kg
Leuchtkraft	$L_{\odot}$	$3,86 \times 10^{26}$ W
effektive Temperatur	$T_{\text{eff}}$	5800 K (Oberfläche)
Zentraltemperatur	$T_{\text{zentral}}$	$15 \times 10^6$ K
Alter	$t_{\odot}$	$4.5 \times 10^9$ a

auf der Erde:  
Solarkonstante  
 $1.37 \text{ kW/m}^2$

Spektraltyp	G2
Leuchtkraftklasse	V
chemische Zusammensetzung (Massenanteil)	
	73% Wasserstoff X
	25% Helium Y
	2% Metalle Z

# Sterne: Statistische Charakteristika



Sterndichte in der Sonnenumgebung

$$n_* \approx 0,05 \text{ pc}^{-3}$$

Sterndichte im Orion-Trapezhaufen

$$n_* \approx 10^3 \text{ pc}^{-3}$$

Sterndichte in Starburst-Regionen

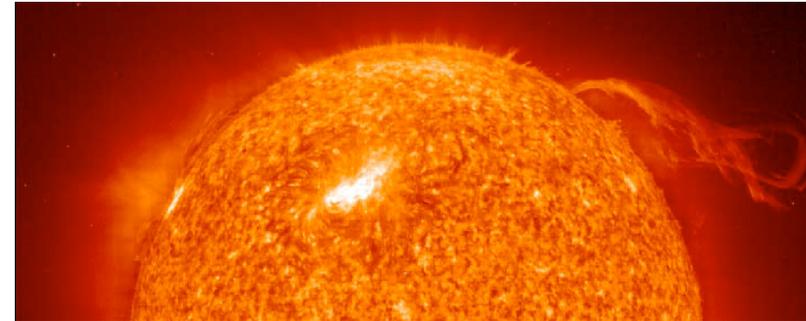
$$n_* \approx 10^4 \text{ pc}^{-3}$$

$$1 \text{ pc} = 3,086 \times 10^{18} \text{ cm}$$

**Anzahl der Sterne in der Milchstraße:  $\approx 10^{11}$**

**Sternentstehungsrate:  $\approx 2 M_{\odot} / \text{Jahr}$**

# Sterne: Statistische Charakteristika



Sterndichte in der Sonnenumgebung

$$n_* \approx 0,05 \text{ pc}^{-3}$$

Sterndichte im Orion-Trapezhaufen

$$n_* \approx 10^3 \text{ pc}^{-3}$$

Sterndichte in Starburst-Regionen

$$n_* \approx 10^4 \text{ pc}^{-3}$$

$$1 \text{ pc} = 3,086 \times 10^{18} \text{ cm}$$

**Anzahl der Sterne in der Milchstraße:  $\approx 10^{11}$**

**Sternentstehungsrate:  $\approx 2 M_{\odot} / \text{Jahr}$**

## Skalen:

Milchstraße

$$\varnothing \approx 30 \text{ kpc} \approx 10^{23} \text{ cm} \approx 100.000 \text{ Lichtjahre}$$

Sonnensystem (Pluto-Bahn)

$$\varnothing \approx 80 \text{ AU} \approx 10^{15} \text{ cm} \approx 11 \text{ Lichtstunden}$$

Erdbahn

$$\varnothing \approx 2 \text{ AU} \approx 3 \times 10^{15} \text{ cm} \approx 17 \text{ Lichtminuten}$$

Sonnendurchmesser

$$\varnothing \approx 1,4 \times 10^{11} \text{ cm}$$

Erddurchmesser

$$\varnothing \approx 1,3 \times 10^9 \text{ cm}$$

WANN?  
WO?

# Sternentstehung in Spiralgalaxien:

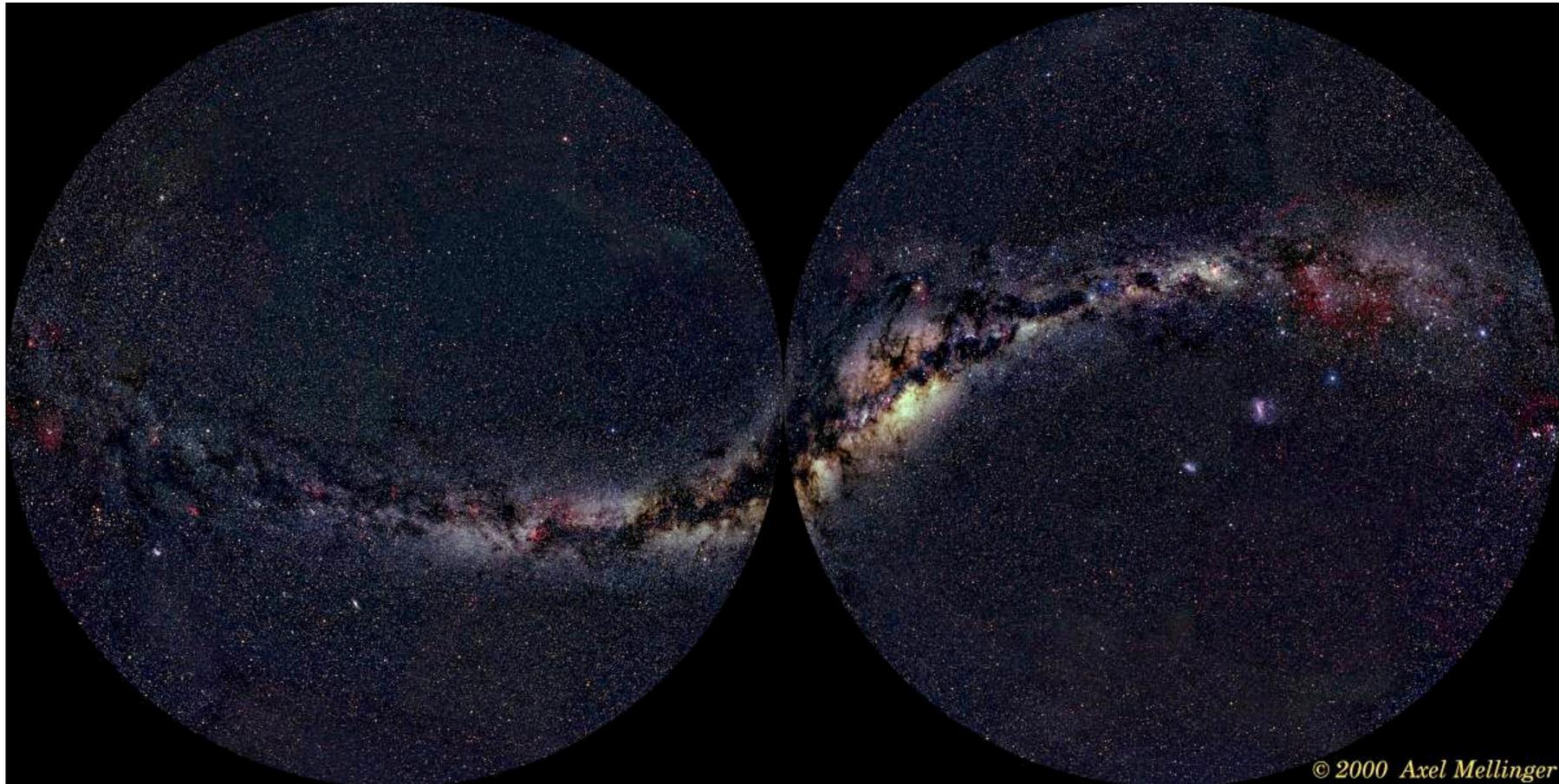


(Hubble Space Telescope Bild)

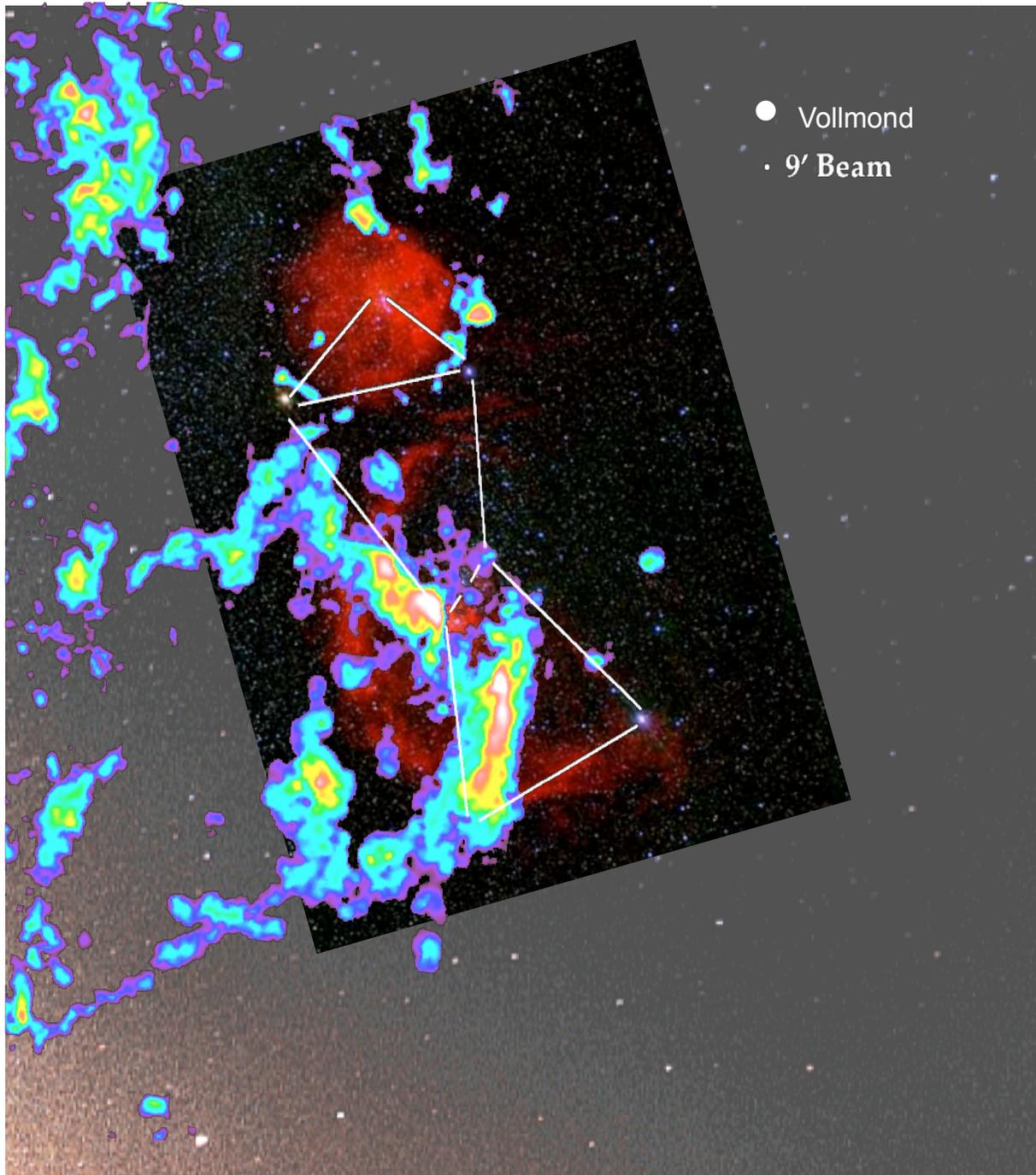
## NGC4622

- Sternentstehung ist *immer* verbunden mit *Wolken aus Gas und Staub*.
- Staub- und Gasbänder findet man *häufig* (aber nicht immer) in Verbindung mit Spiralarmen)
- Dasselbe gilt für die Sternentstehung.

# Sternentstehung in der Milchstraße



Am Nachthimmel sieht man **Dunkelwolken** und **Sterne**:  
Die hellsten Sterne sind *massereich* und daher *jung*.  
→ Sternentstehung ist wichtig um beobachtete Struktur  
der Milchstraße zu verstehen.

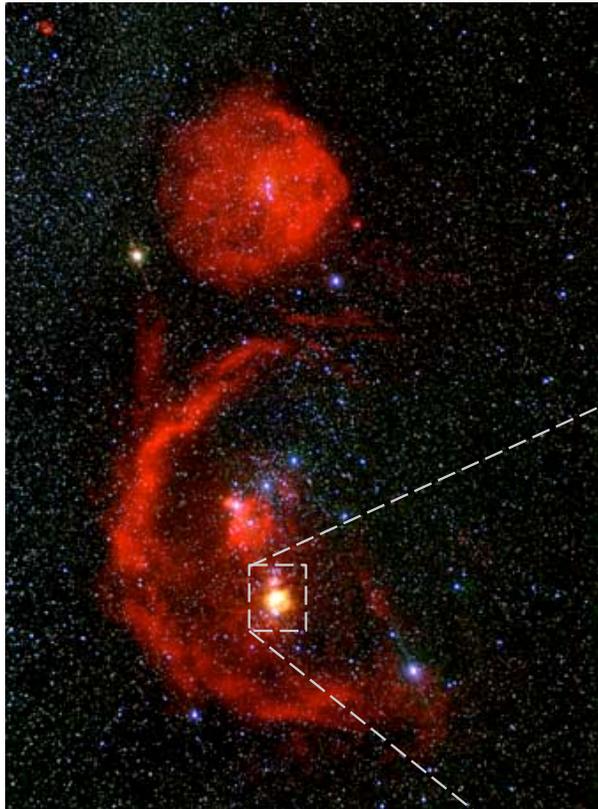


# Stern- entstehung in Orion

Wir sehen

- *Sterne* (im sichtbaren Licht)
- Atomaren Wasserstoff  
(in  $H\alpha$  -- *rot*)
- Molekularen Wasserstoff  $H_2$   
(Radiostrahlung von Tracermolekül CO *farbcodiert*)

# Lokales SE Gebiet: Trapezhaufen in Orion



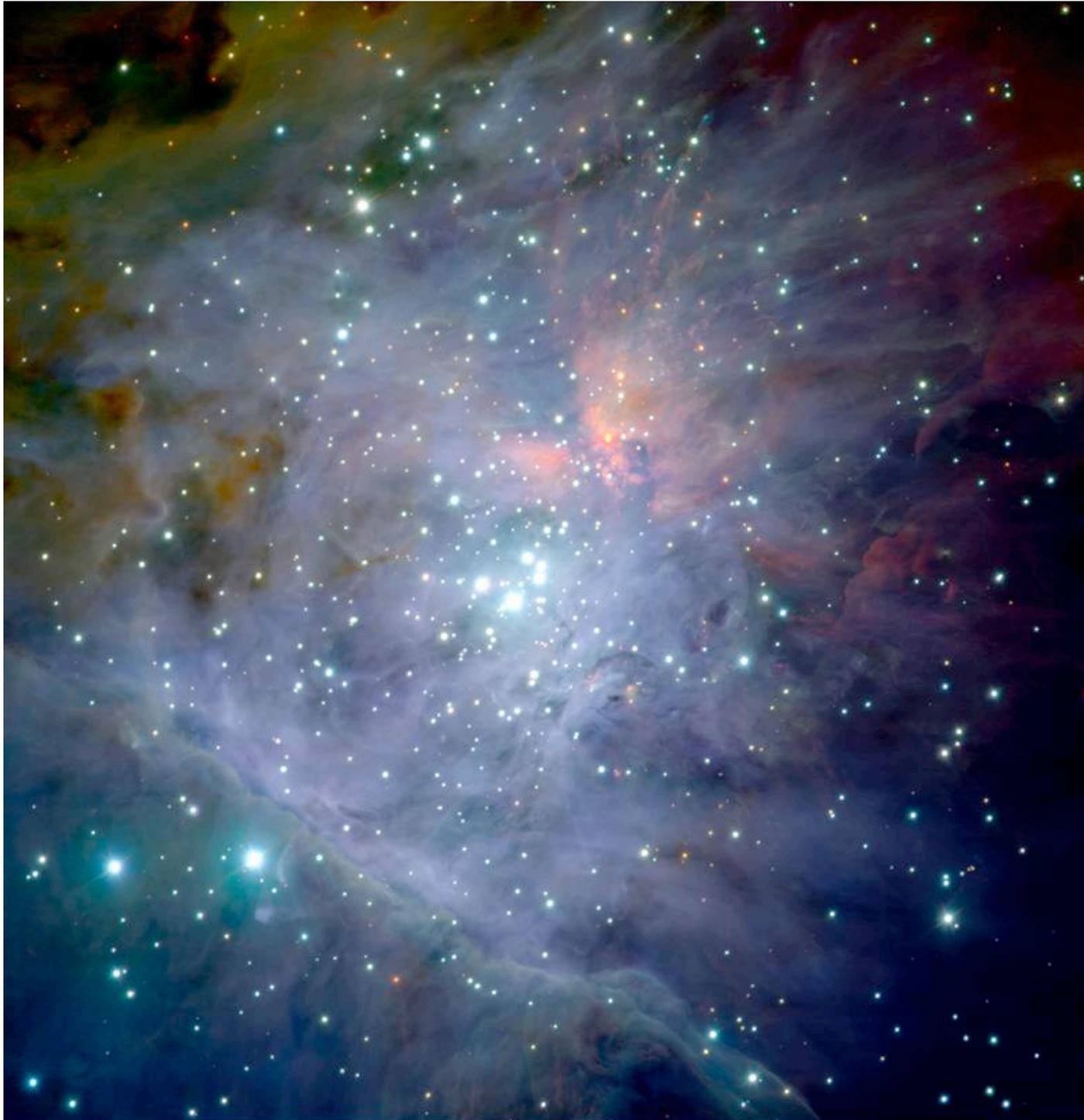
Sternbild Orion

Die Orionmolekülwolke ist die Geburtsstätte mehrerer junger Sternhaufen.

Der Trapezhaufen ist noch ``eingebettet`` und nur im IR Wellenbereich sichtbar. Der Haufen besteht aus ~2000 jungen Sternen.



Trapezhaufen

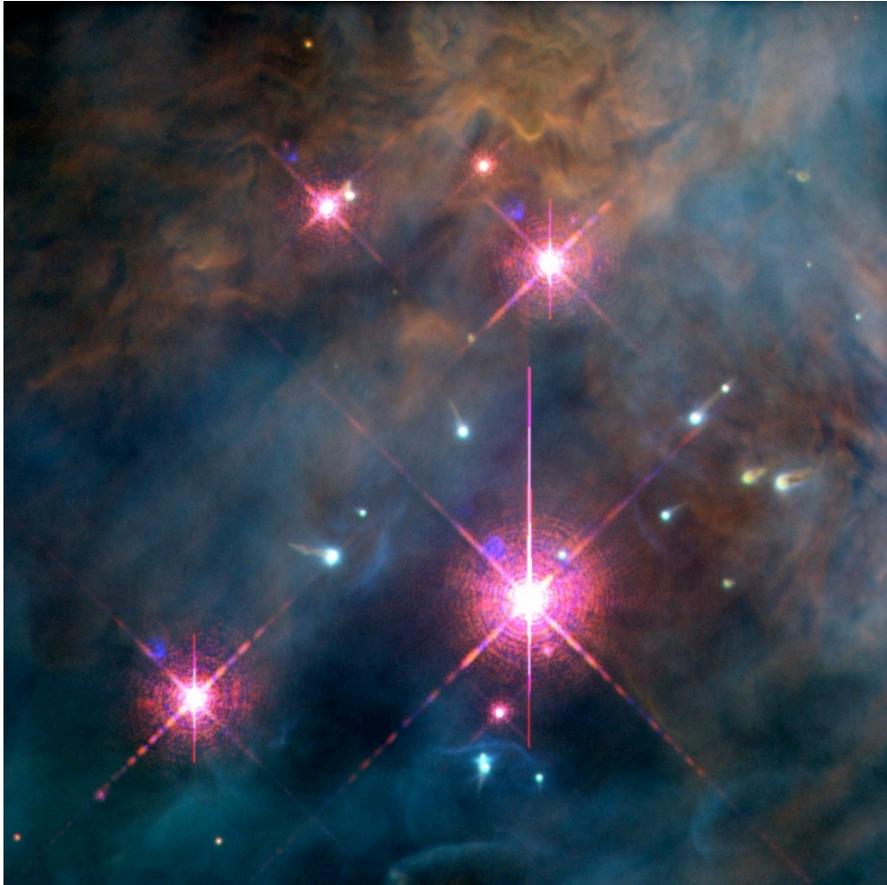


## Trapez- haufen (Detail)

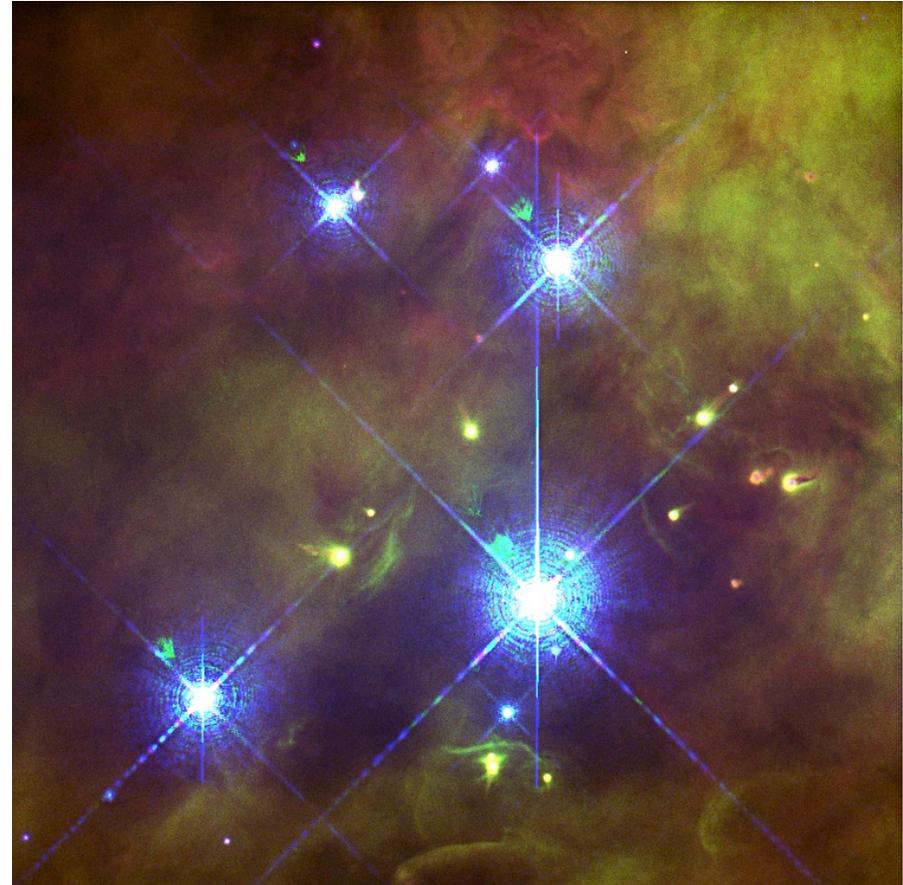
- Sterne ent-  
stehen in  
**Haufen**
- Sterne ent-  
stehen in  
**Molekül-  
wolken**
- **Rückkopp-  
lungseffekte**  
sind wichtig

(Mehrfarbenaufnahme  
in J,H,K: McCaughrean,  
VLT, Paranal, Chile)

# Trapezhaufen: Zentralgebiet

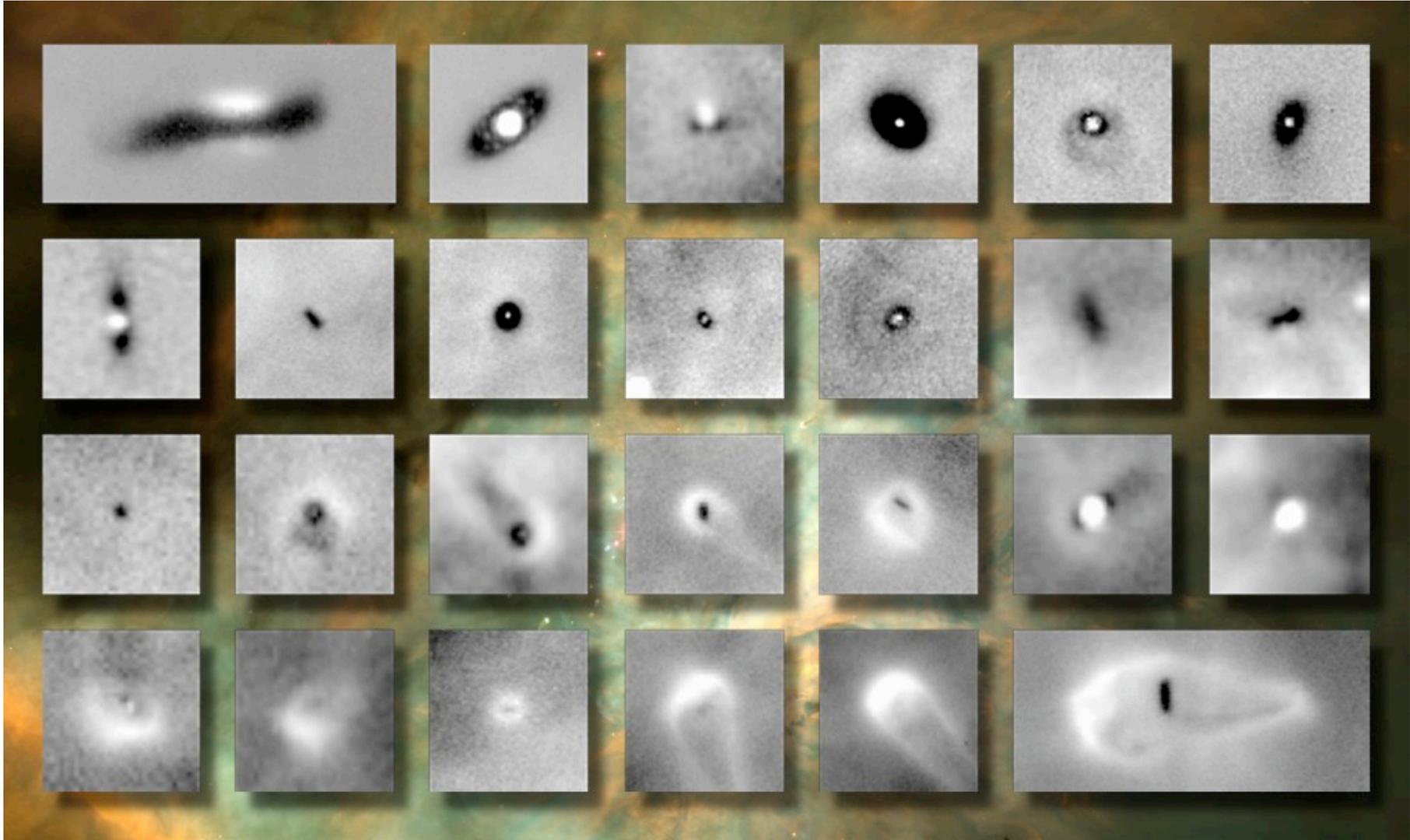


Der Großteil der ionisierenden Strahlung kommt vom Zentralstern  **$\Theta 1C$  Orionis**



**Proplyds:** Verdampfende ``protoplanetare`` Scheiben um junge massearme Protosterne

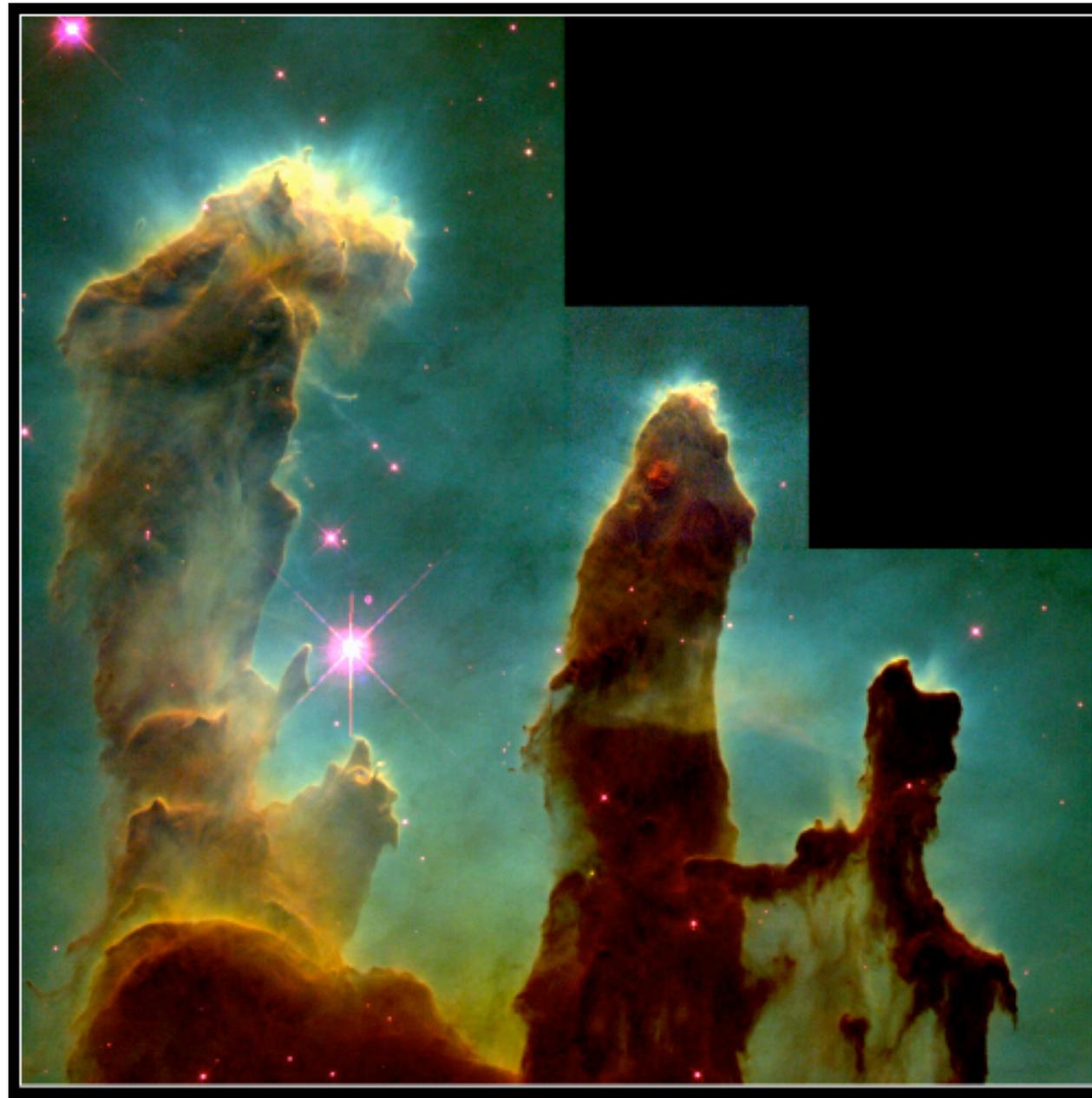
# Weitere Details: Siluett-Scheiben in Orion



Protostellare Scheiben schatten die Photodissoziationsregion im Hintergrund ab. Jedes Bild ist 750 AU x 750 AU groß.

(Daten von Mark McCaughrean)

Klassen: Nacht der Wissenschaft (10.11.2007)



HST Aufnahme

*Pillars of God* (im Adlernebel): Entstehung kleiner Gruppen junger Sterne in den ``Spitzen`` der Gas- und Staubsäulen....

Klassen: Nacht der Wissenschaft (10.11.2007)

-bereich  
Aufnahme im  
Infraroten.





IR Aufnahme mit dem ESO-VLT

*Pillars of God* (im Adlernebel): Entstehung kleiner Gruppen junger Sterne in den ``Spitzen`` der Gas- und Staubsäulen....



IR Aufnahme mit dem ESO-VLT

*Pillars of God* (im Adlernebel): Entstehung kleiner Gruppen junger Sterne in den ``Spitzen`` der Gas- und Staubsäulen....

10.11.2007)

WIE?

# Interstellare Materie: ISM

Häufigkeit bezogen auf 1.000.000 Wasserstoff-Atome

Element Ordnungszahl kosmische Häufigkeit

Wasserstoff	H	1	1.000.000
Deuterium	${}_1\text{H}^2$	1	16
Helium	He	2	68.000
Kohlenstoff	C	6	420
Stickstoff	N	7	90
Sauerstoff	O	8	700
Neon	Ne	10	100
Natrium	Na	11	2
Magnesium	Mg	12	40
Aluminium	Al	13	3
Silicium	Si	14	38
Schwefel	S	16	20
Calcium	Ca	20	2
Eisen	Fe	26	34
Nickel	Ni	28	2

Wasserstoff ist das häufigste Element (mehr als 90% aller Atome). Im Vergleich zur kosmischen Häufigkeit sind manche Elemente im ISM seltener, d.h. abgereichert. Ein Teil ihrer Atome befinden sich nicht mehr in der Gasphase, sondern in Staubteilchen.

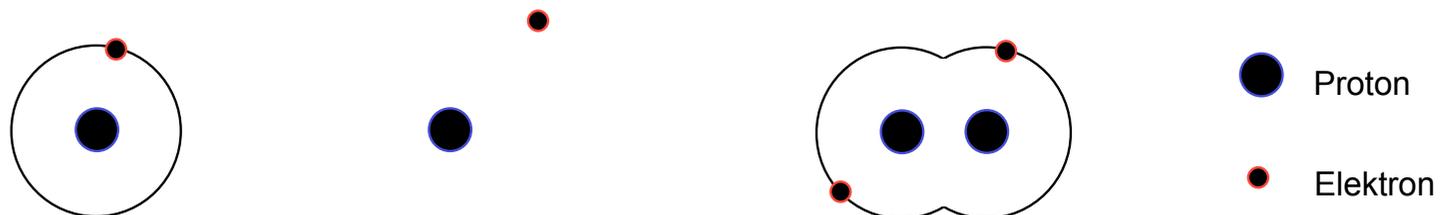
# Phasen der ISM

Die Dominanz von Wasserstoff legt eine Klassifizierung der Regionen des ISM gemäß des Zustands von H nahe:

*Ionisierter atomarer Wasserstoff* HII ( $H^+$ )  
*Neutraler atomarer Wasserstoff* HI ( $H$ )  
*Molekularer Wasserstoff*  $H_2$

Ionisation  
Phasenübergang

Die jeweiligen Regionen bestehen nahezu zu 100% aus der entsprechenden Komponente, wobei, die Grenzgebiete zwischen HII, H und  $H_2$  sehr dünn sind.



# Phasen der ISM

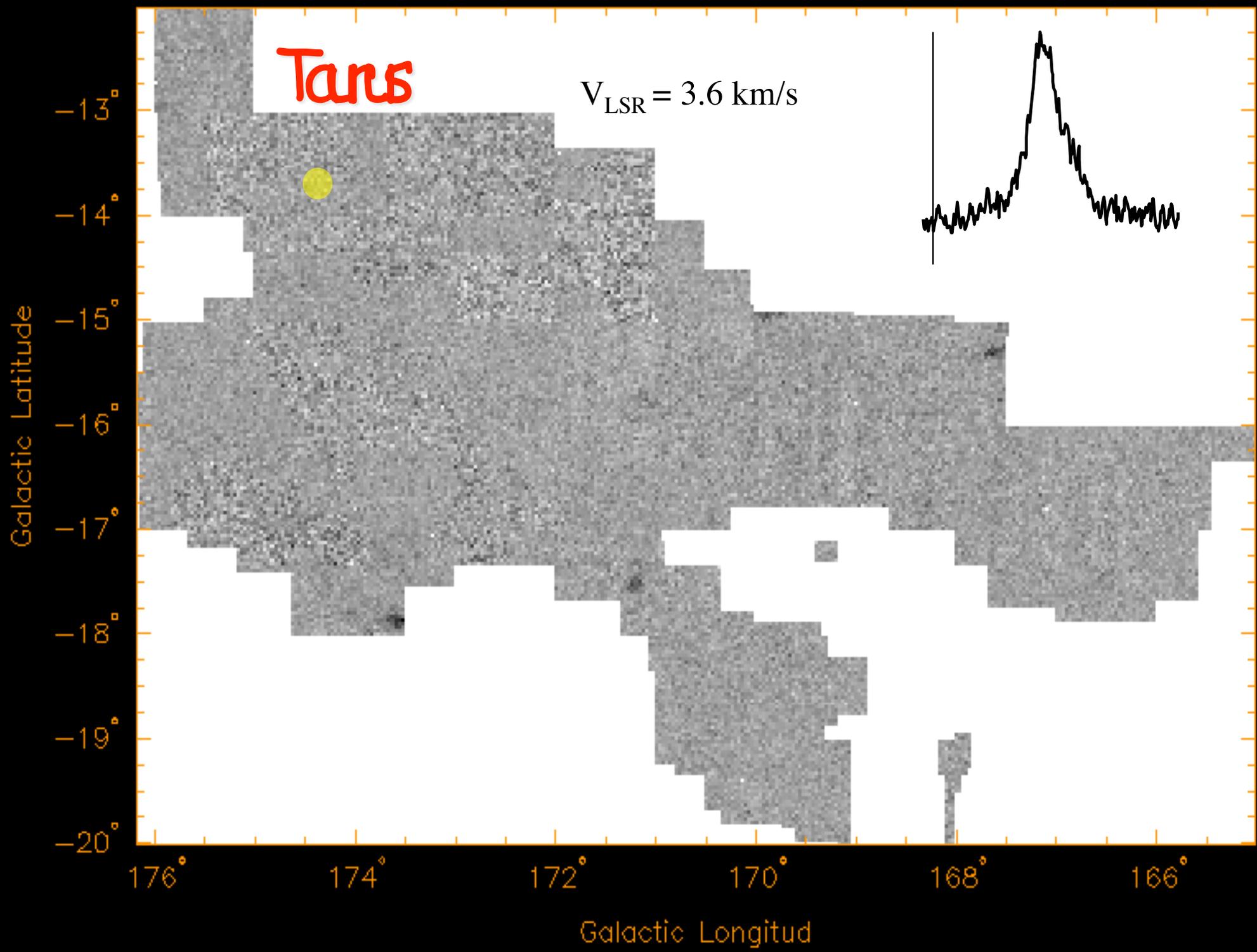
Die Dominanz von Wasserstoff legt eine Klassifizierung der Regionen des ISM gemäß des Zustands von H nahe:

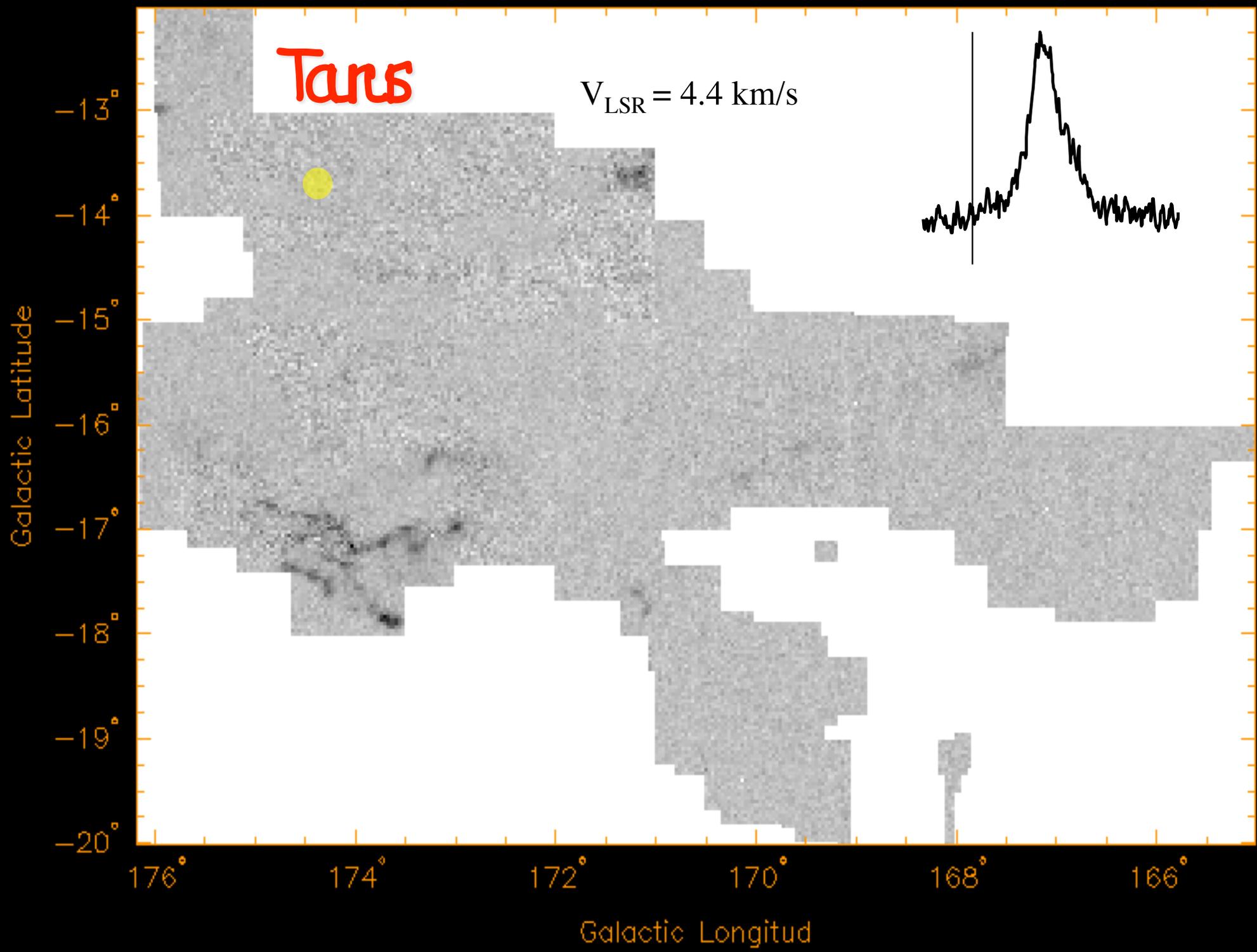
*Ionisierter atomarer Wasserstoff* HII ( $H^+$ )  
*Neutraler atomarer Wasserstoff* HI ( $H$ )  
*Molekularer Wasserstoff*  $H_2$

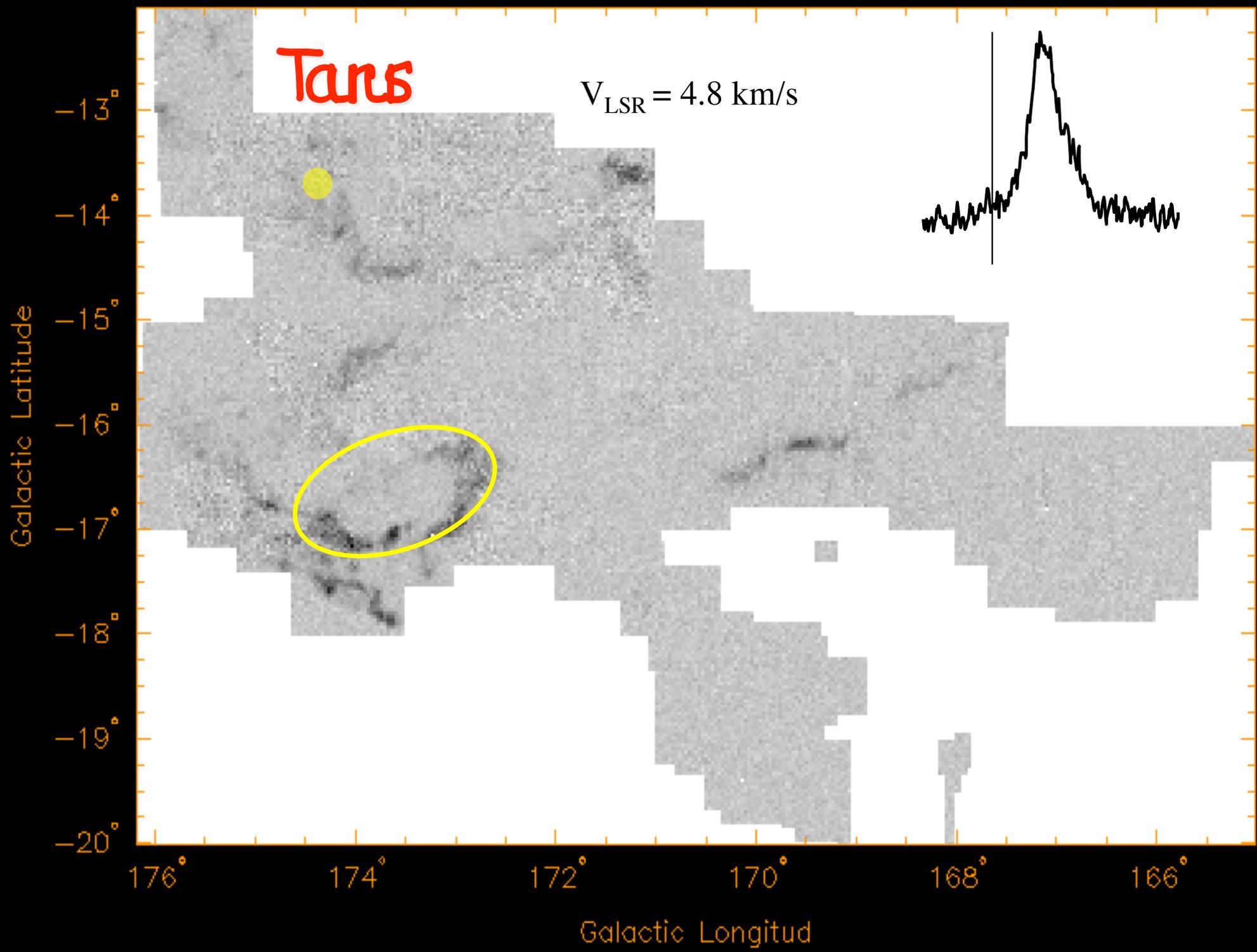
 Ionisation  
Phasenübergang

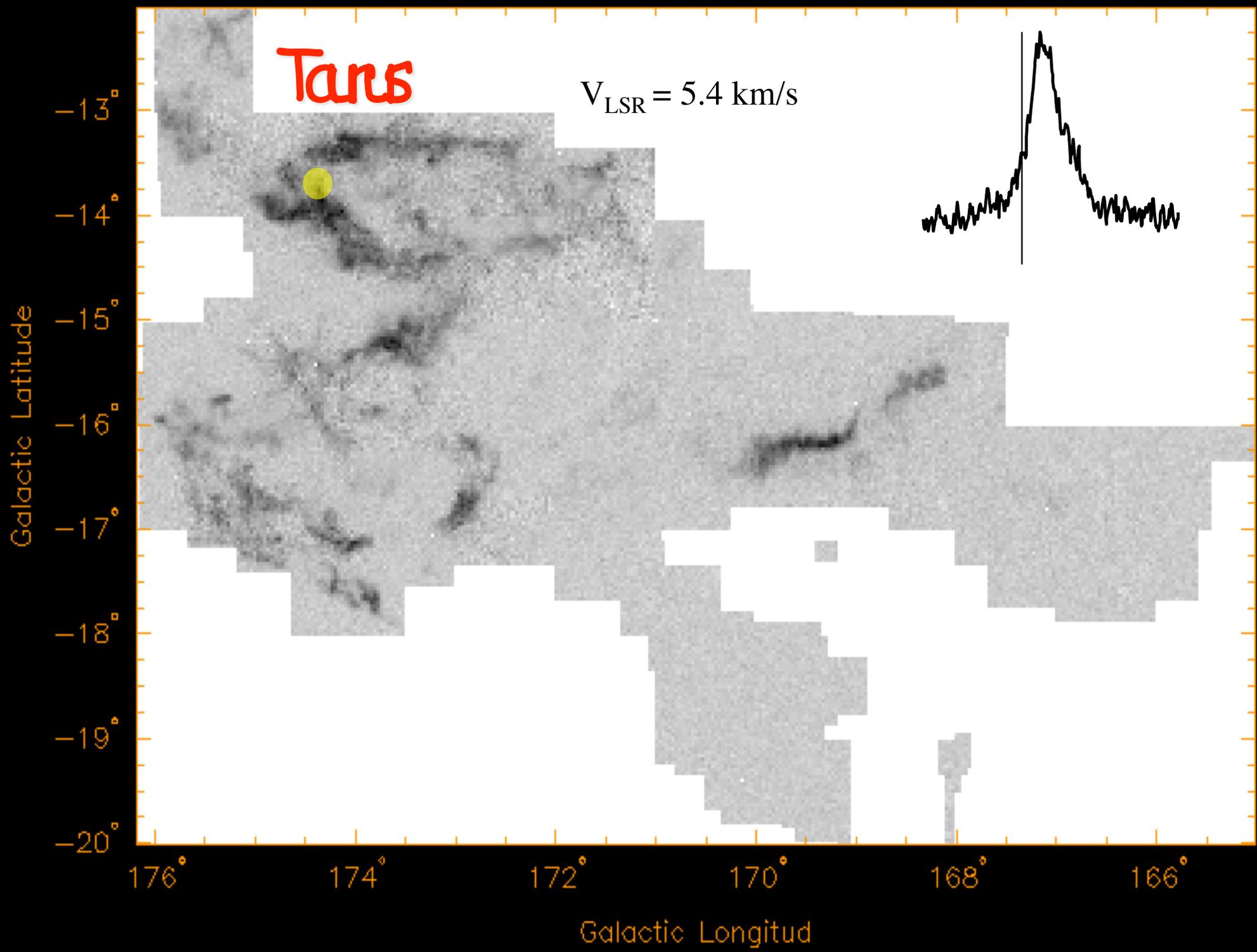
Die jeweiligen Regionen bestehen nahezu zu 100% aus der entsprechenden Komponente, wobei, die Grenzgebiete zwischen HII, H und  $H_2$  sehr dünn sind.

Der größte Teil (ca. 80%) des ISM machen HI und HII-Gebiete niedriger Dichte aus.  $H_2$  befindet sich in *Molekülwolken*, die oft von HII-Gebiete hoher Dichte begleitet werden. In der Milchstraße entstehen Sterne immer in Molekülwolken!







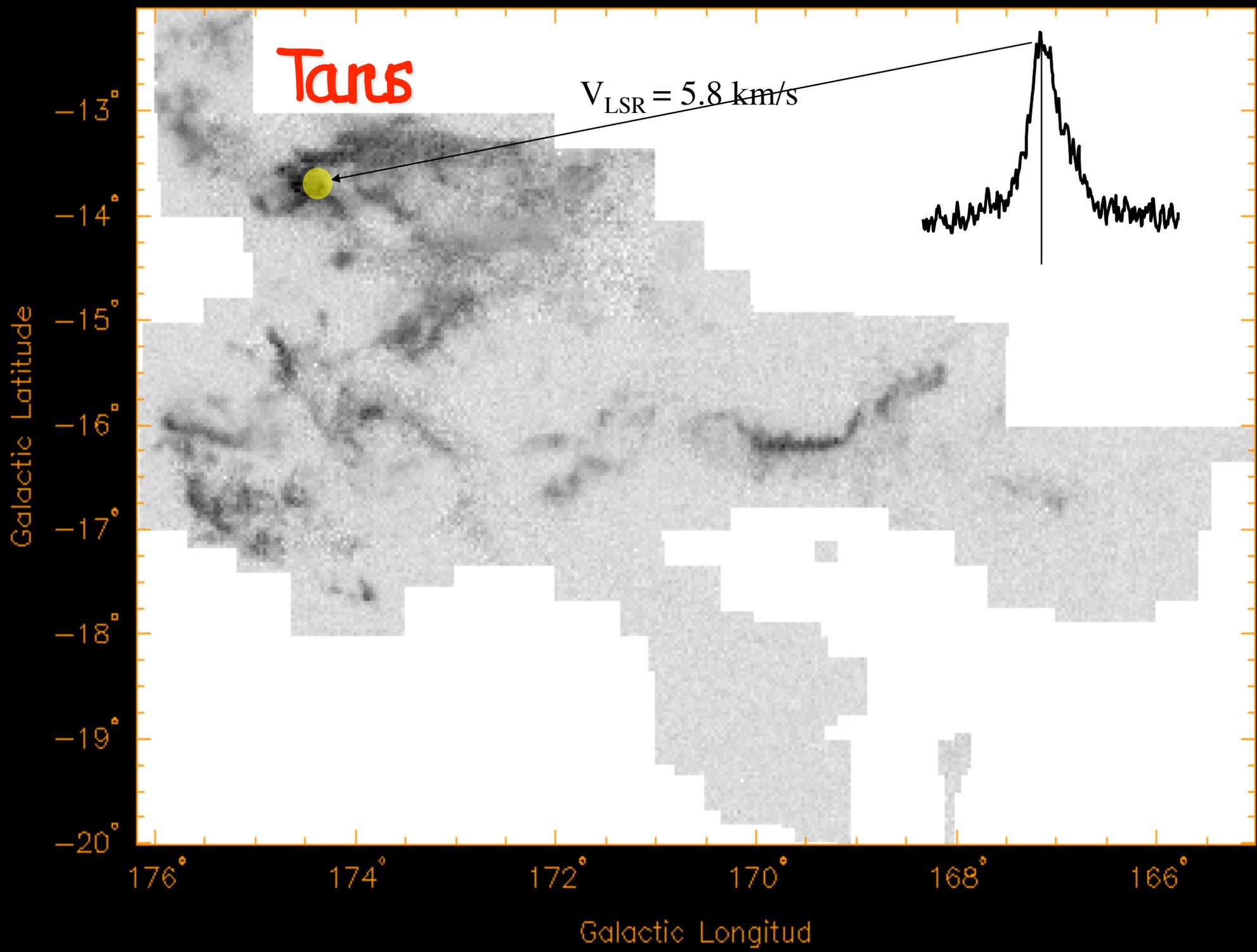


Taurus

$V_{\text{LSR}} = 5.4 \text{ km/s}$

Galactic Latitude

Galactic Longitude

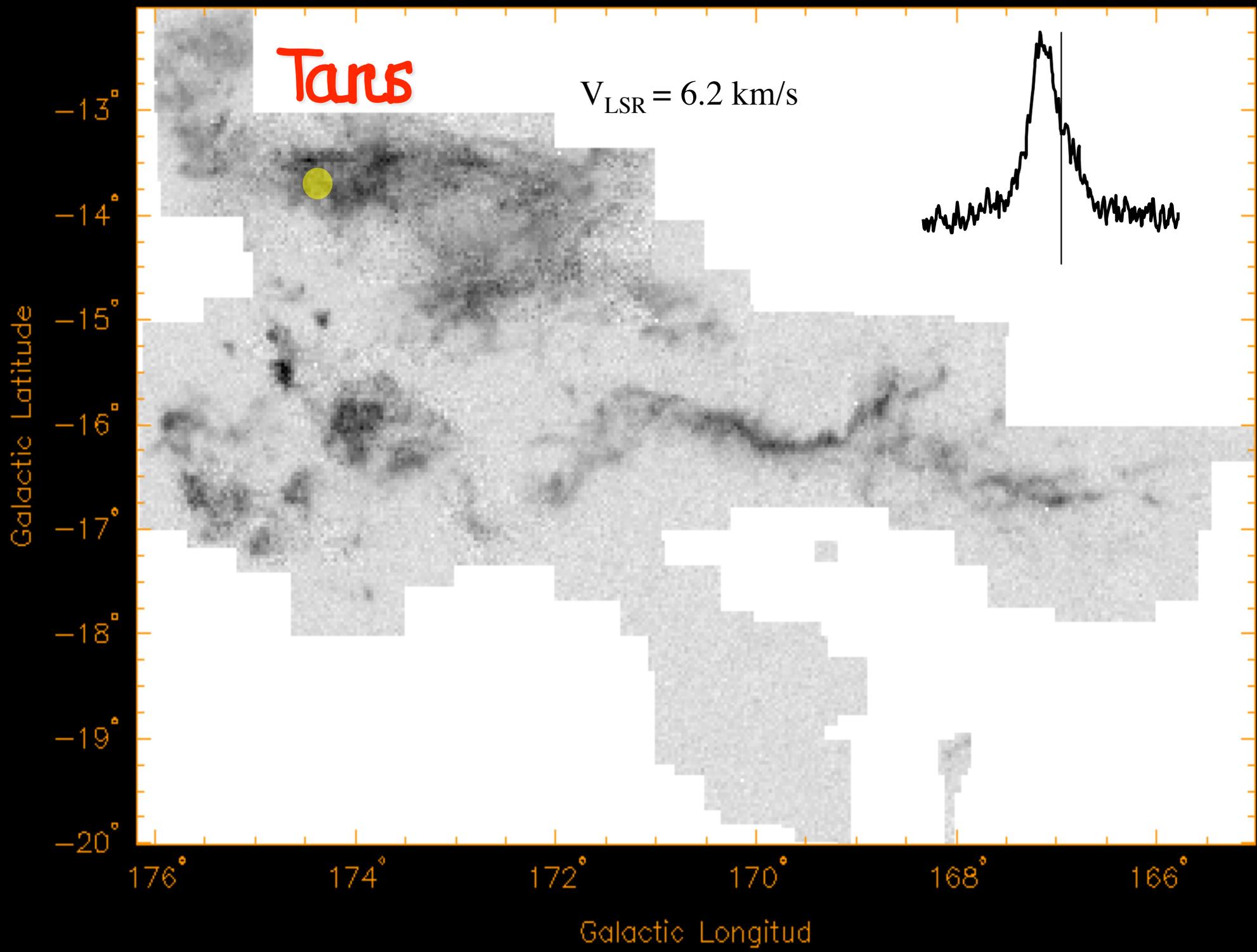


Tanus

$V_{\text{LSR}} = 5.8 \text{ km/s}$

Galactic Latitude

Galactic Longitude

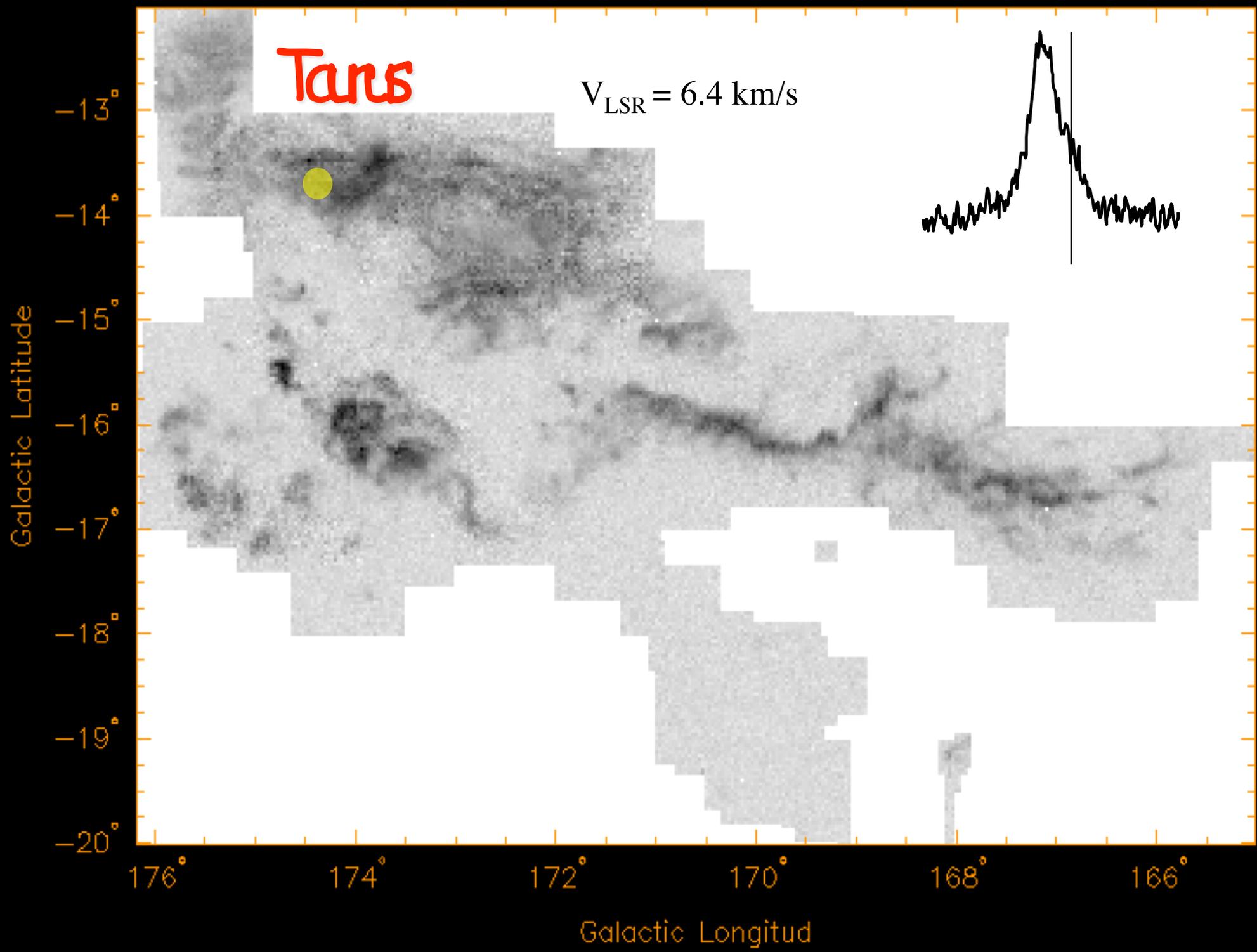


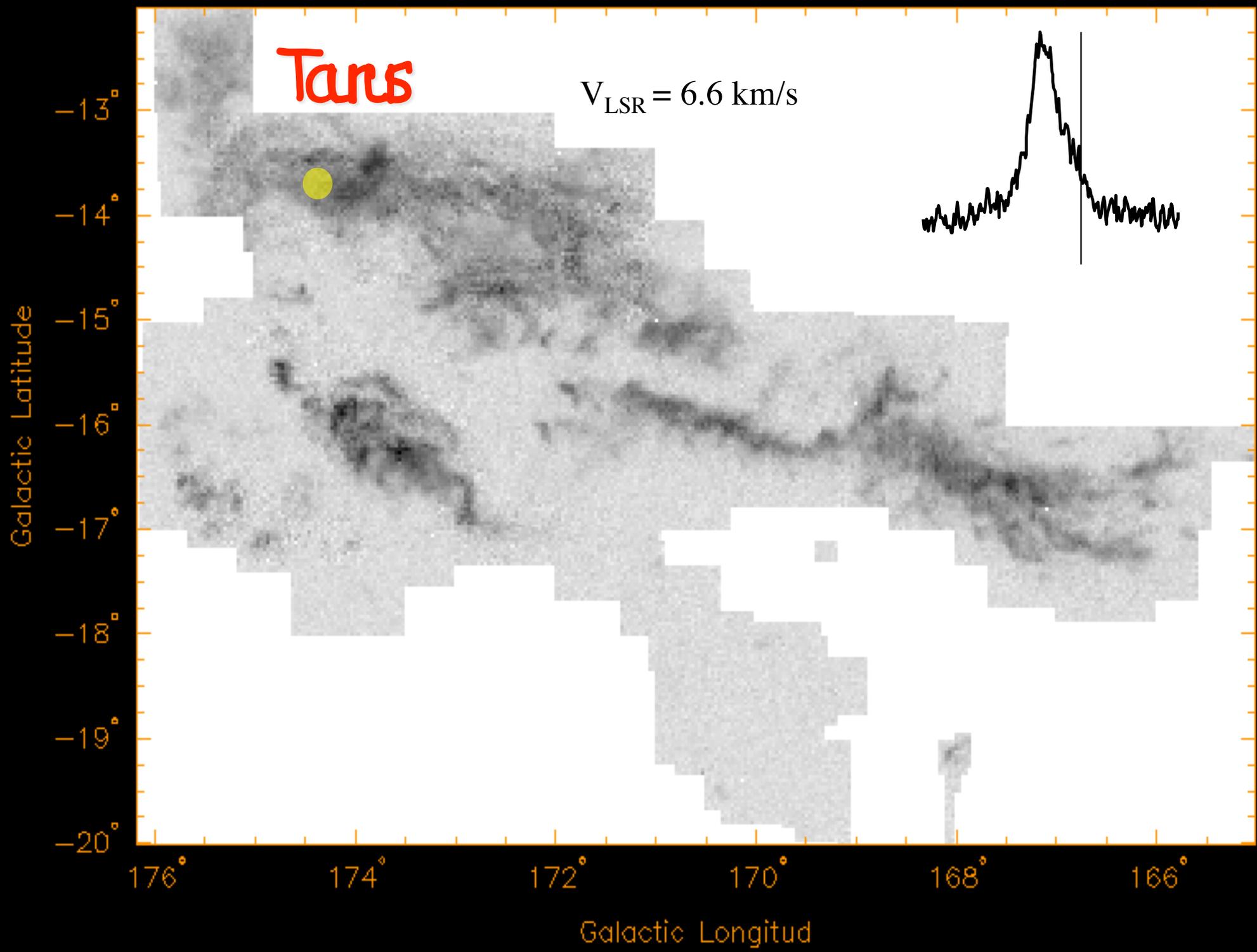
Tanus

$V_{\text{LSR}} = 6.2 \text{ km/s}$

Galactic Latitude

Galactic Longitud



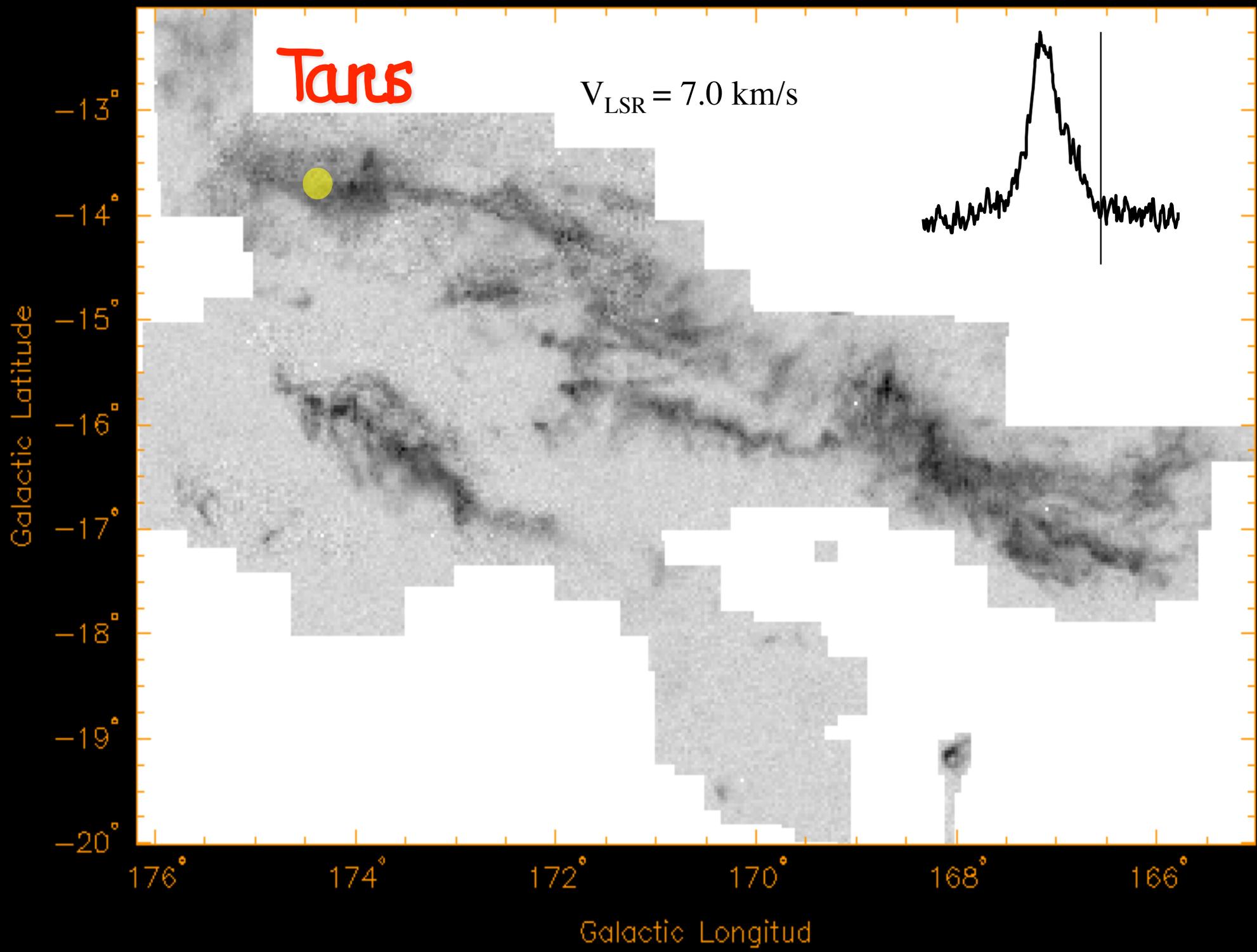


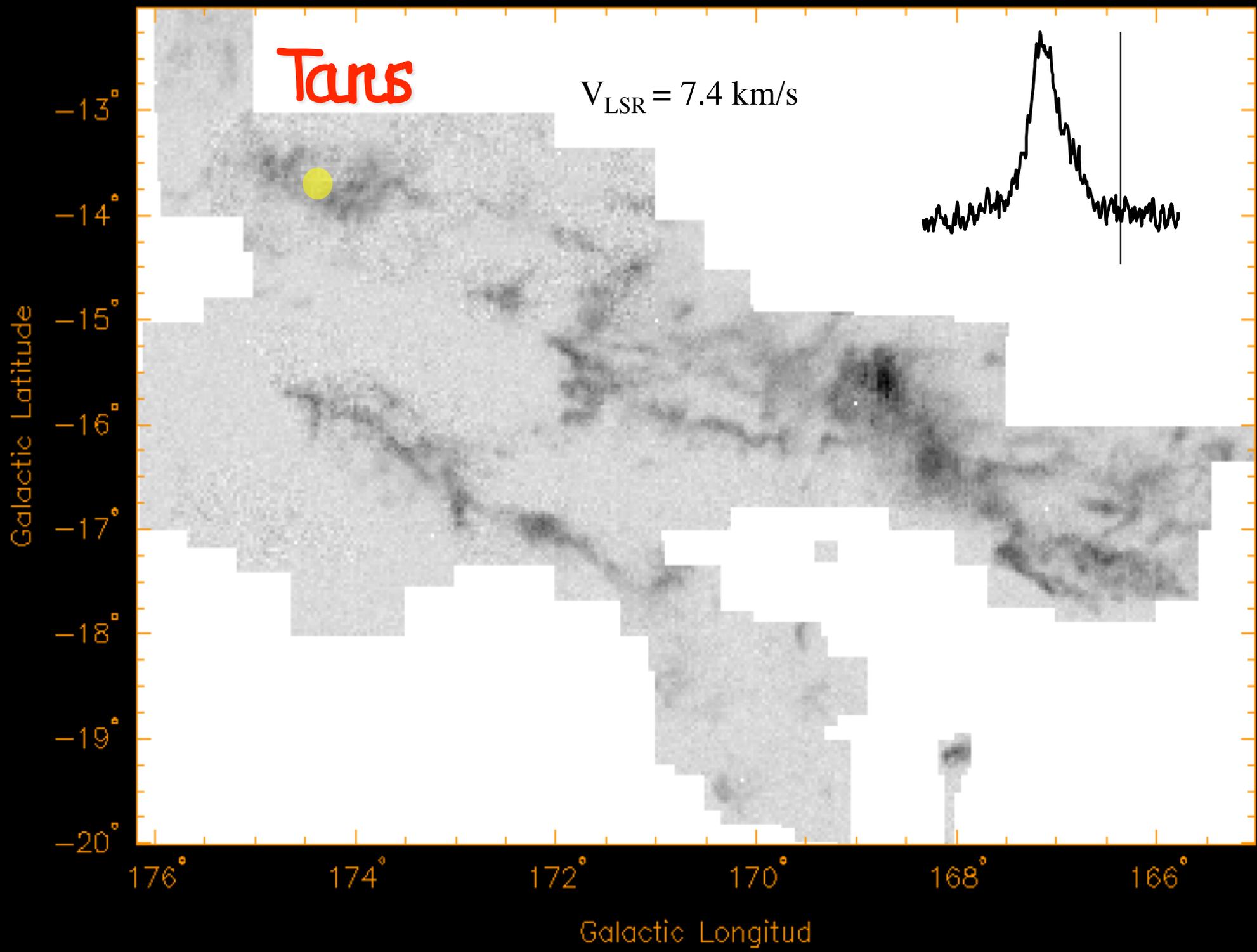
Taurus

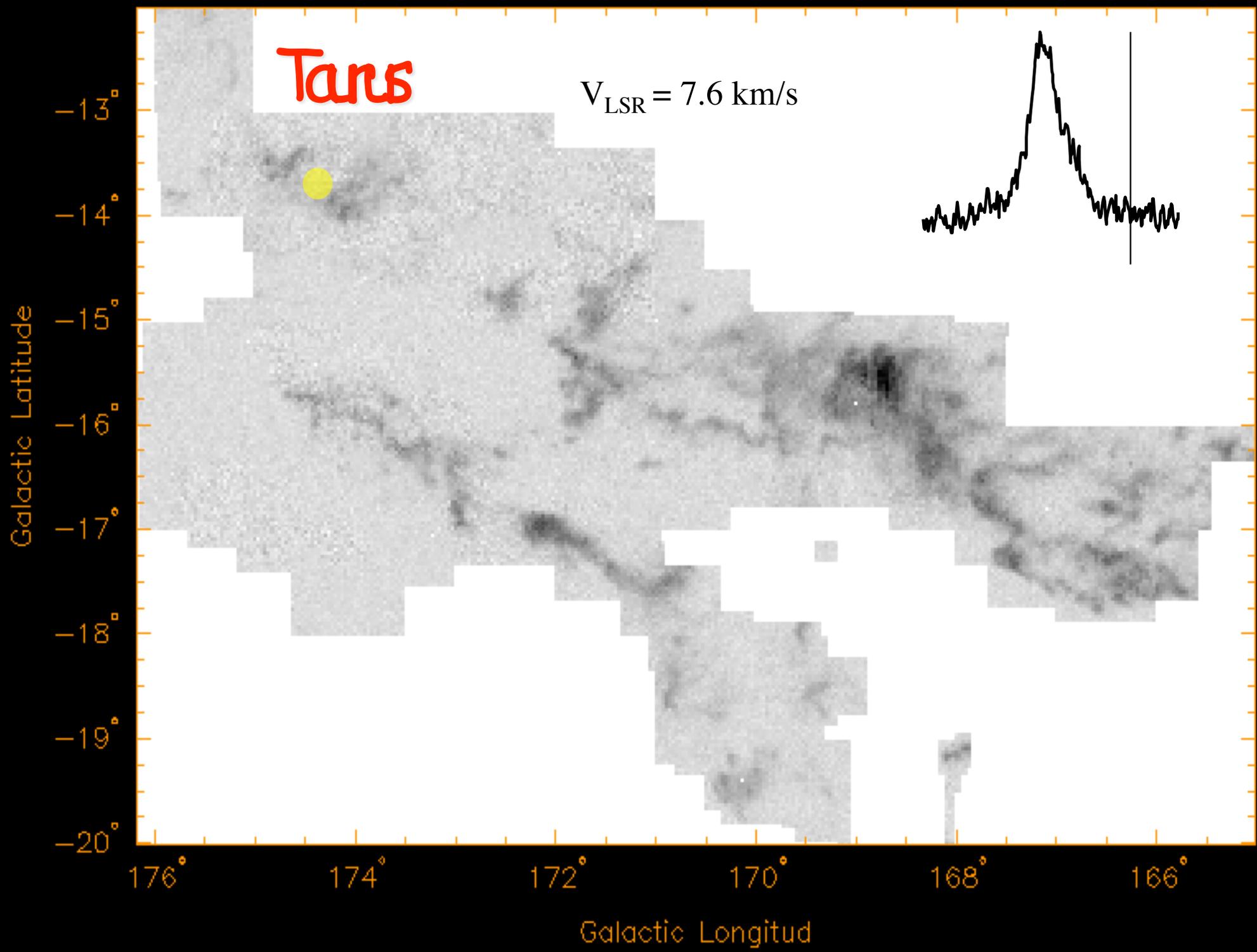
$V_{\text{LSR}} = 6.6 \text{ km/s}$

Galactic Latitude

Galactic Longitude





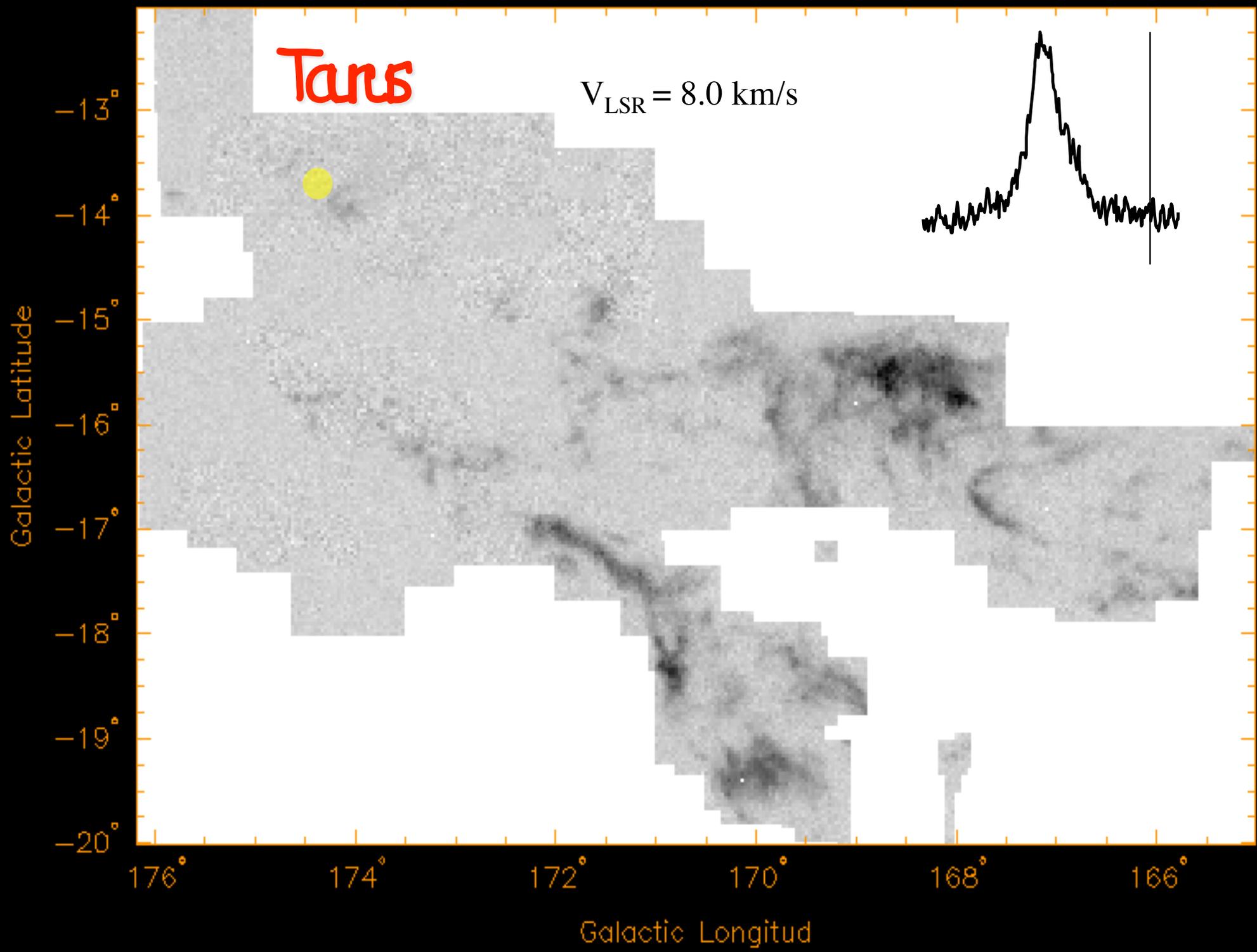


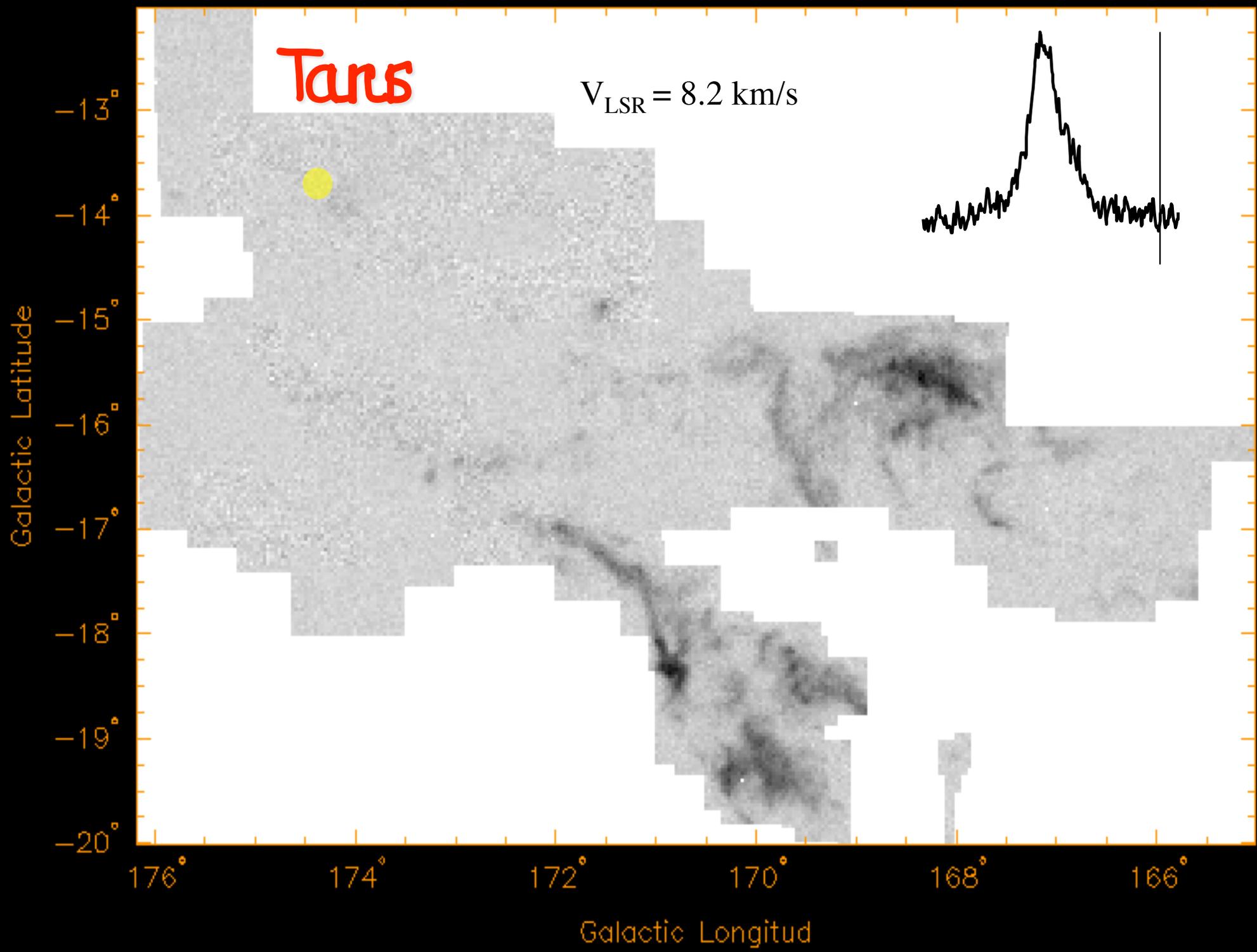
Taurus

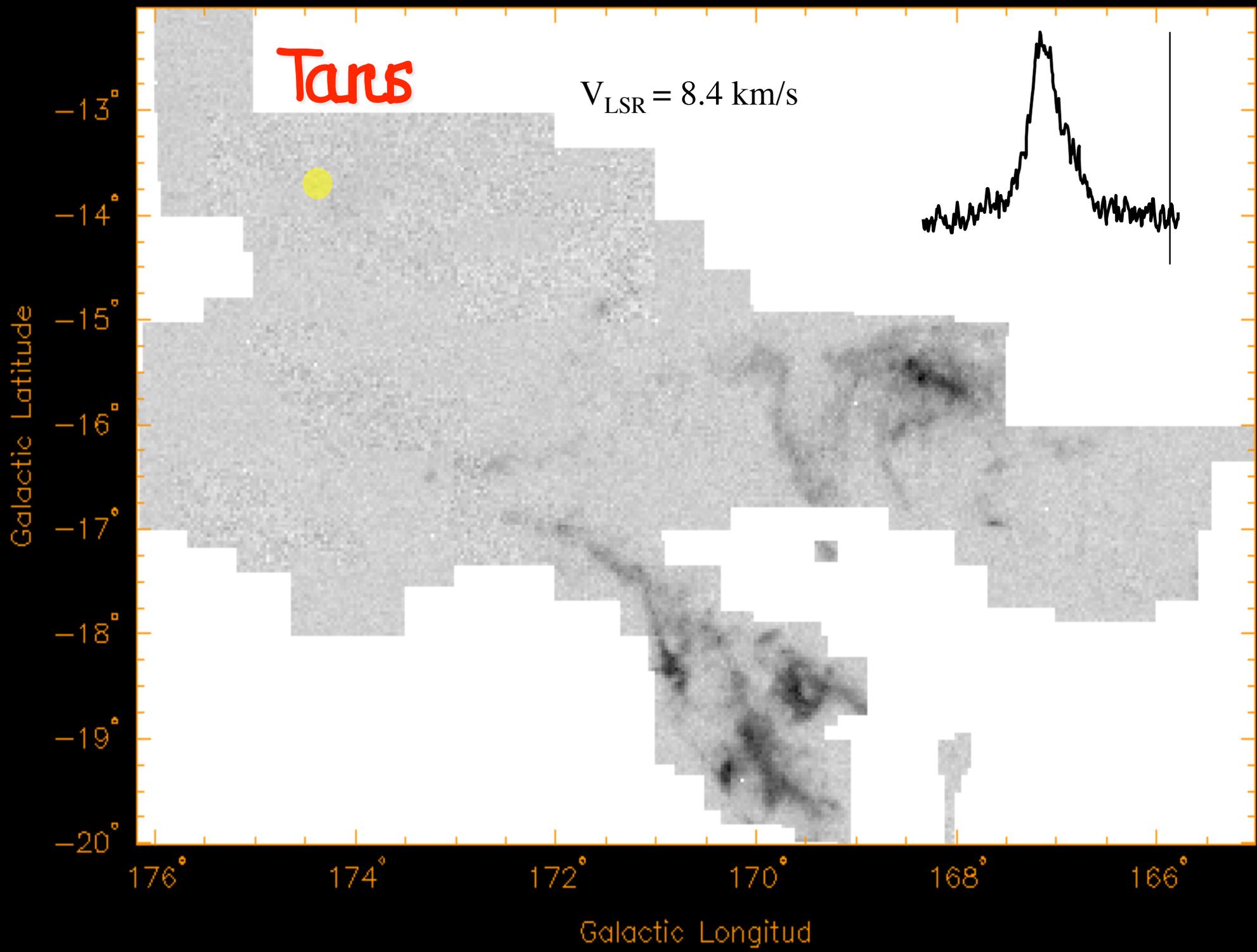
$V_{\text{LSR}} = 7.6 \text{ km/s}$

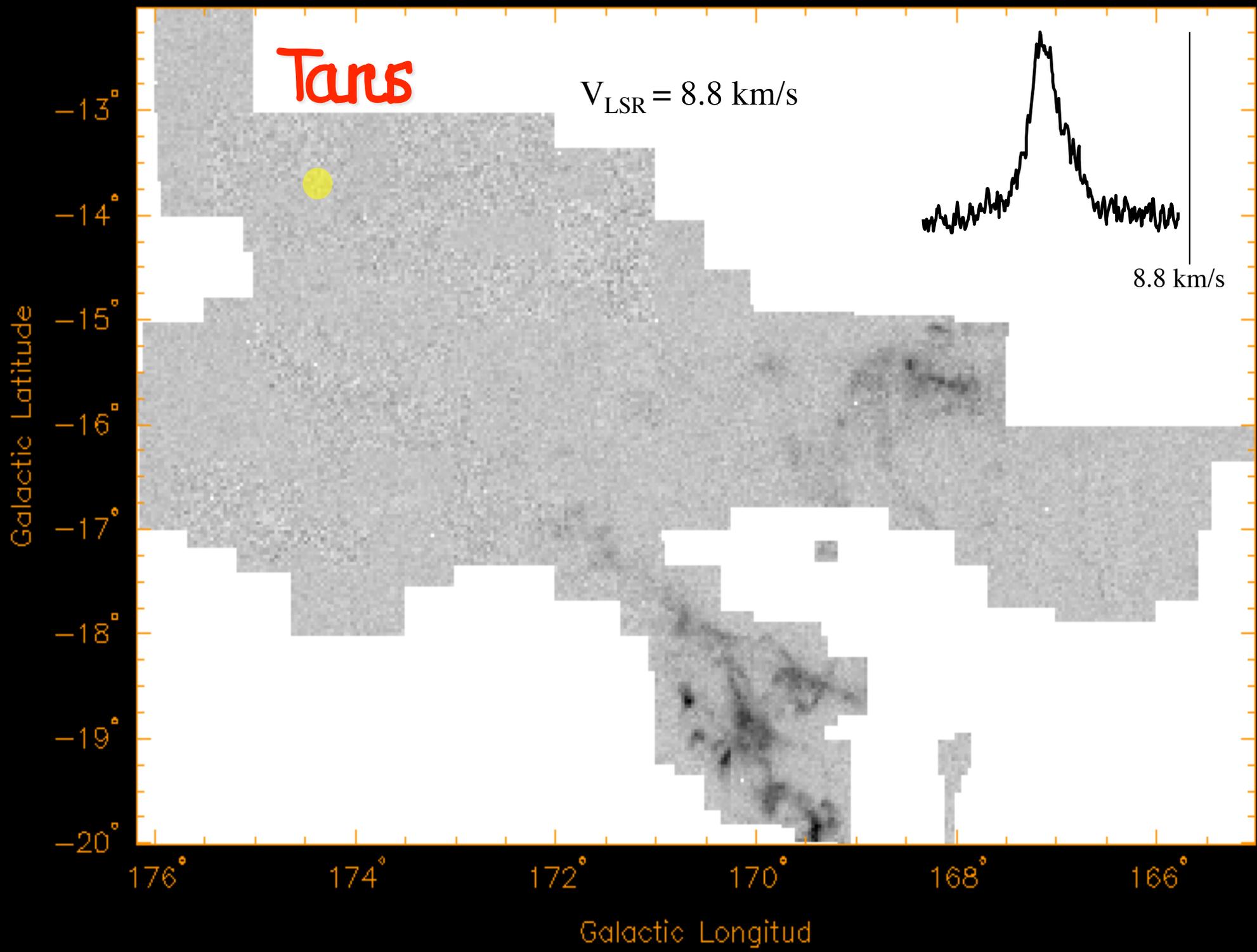
Galactic Latitude

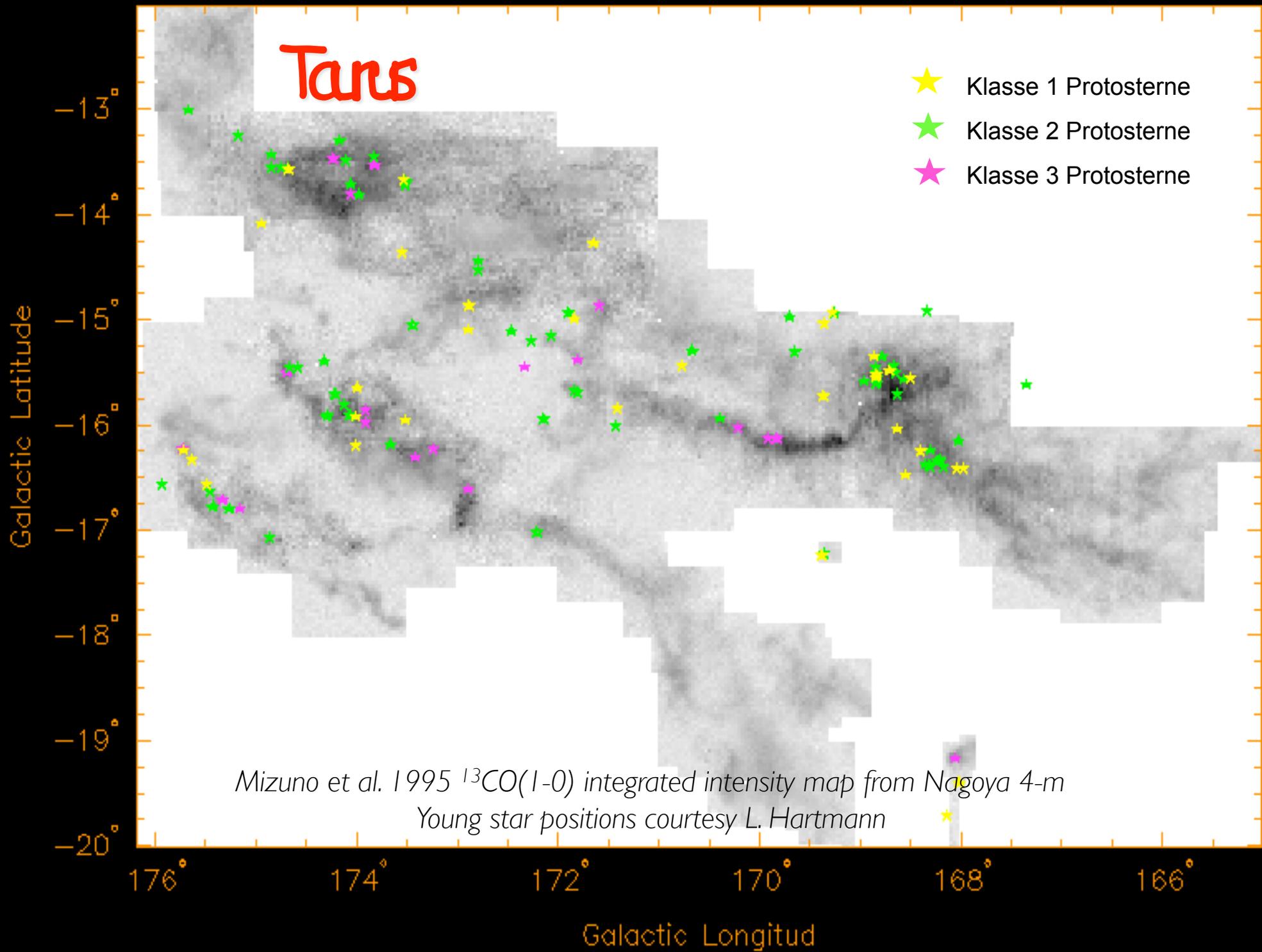
Galactic Longitude





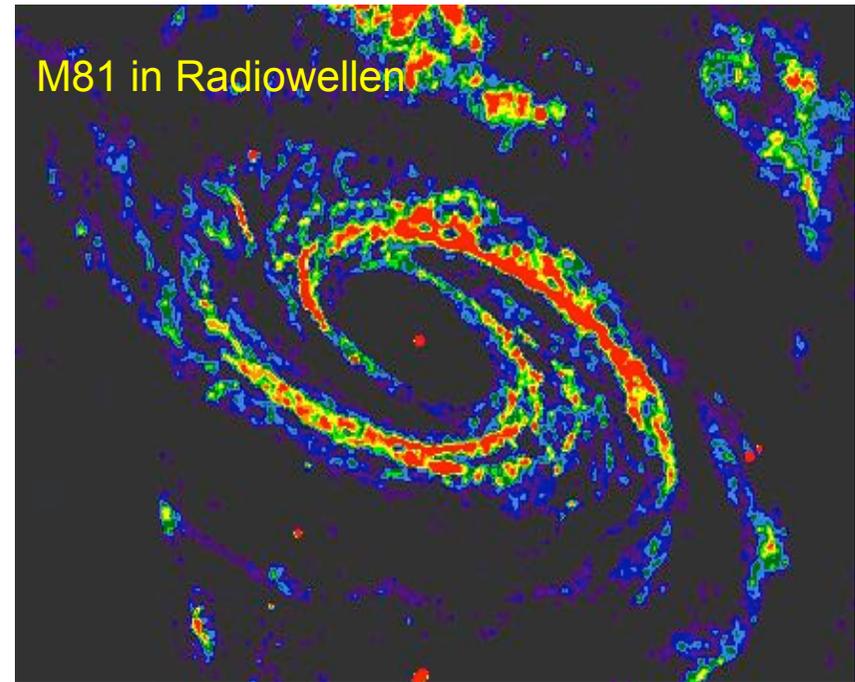
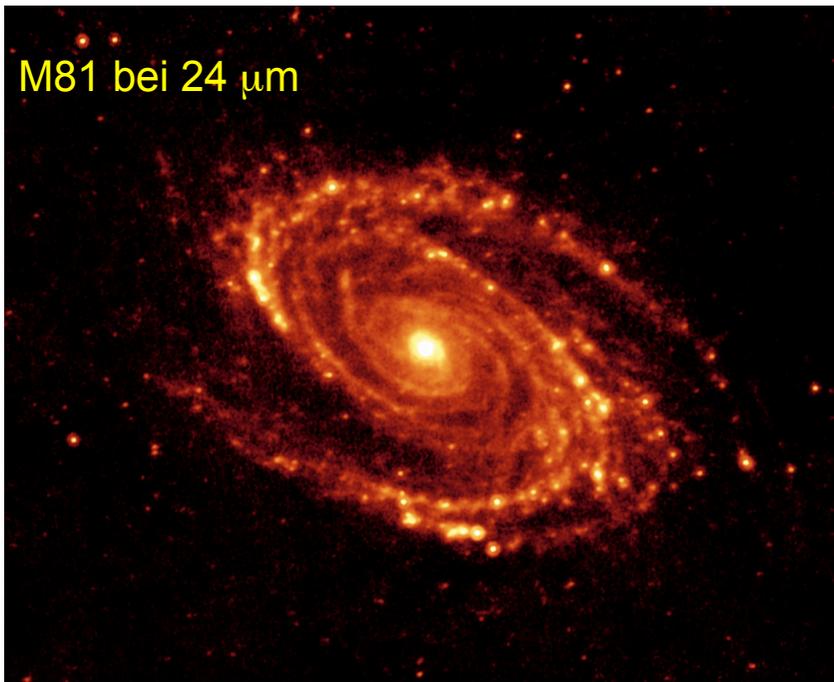
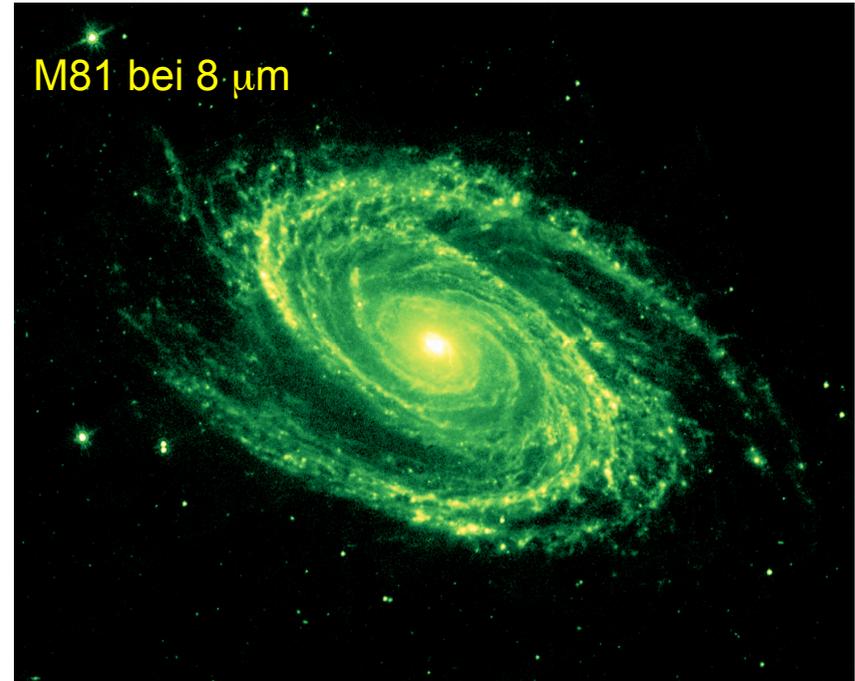




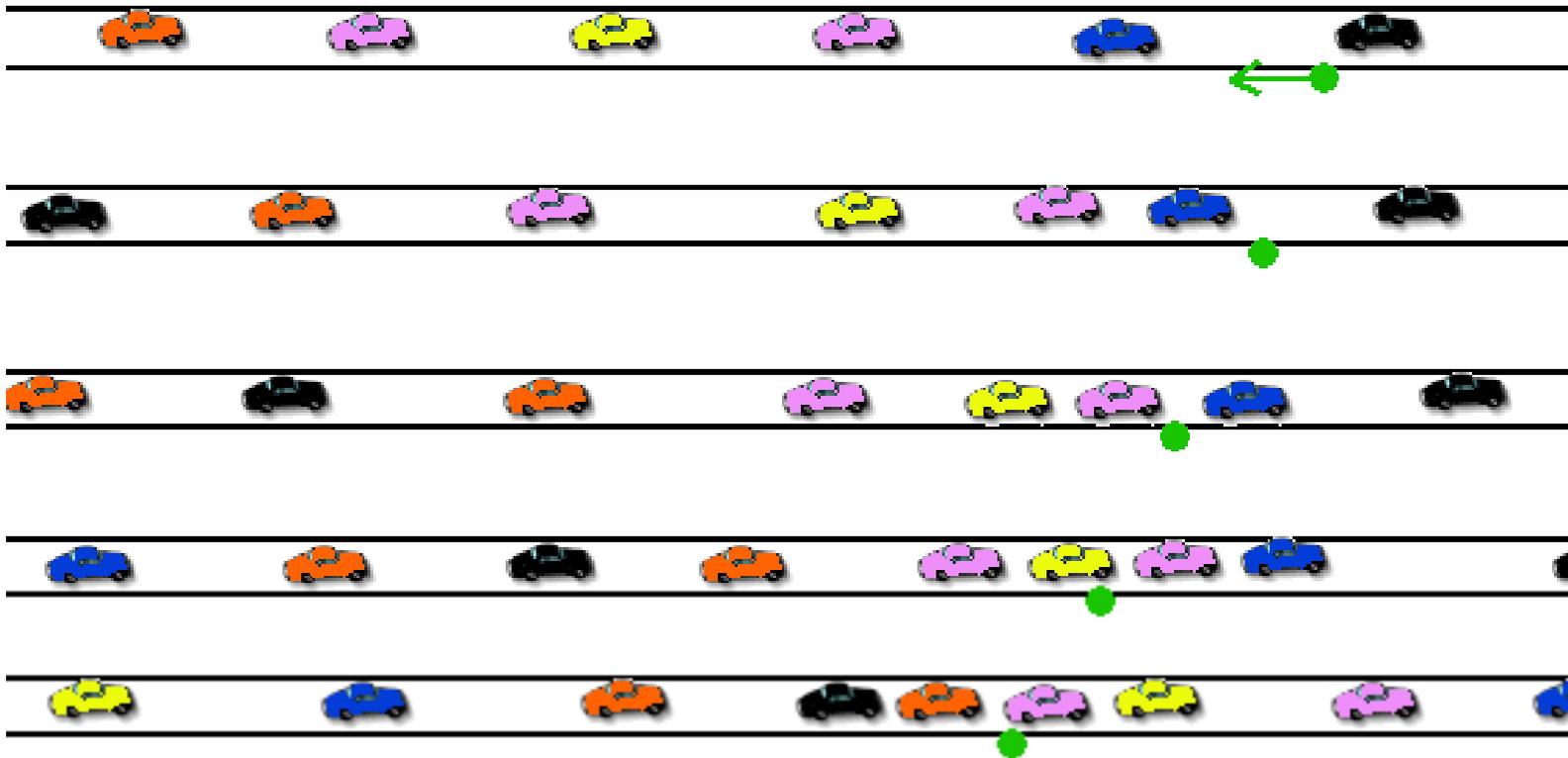


WIE?

Zusammenhang zwischen Sternbildung und Gasverteilung am Beispiel von M81



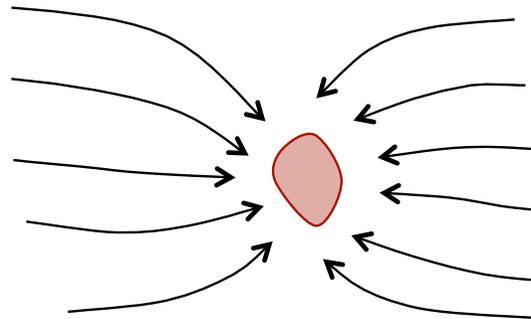
# Dichtwellentheorie



Dichtewellen: Spiralarme sind „Stautellen“ im Fluss der interstellaren Materie.

# Sternentstehung: große Skalen

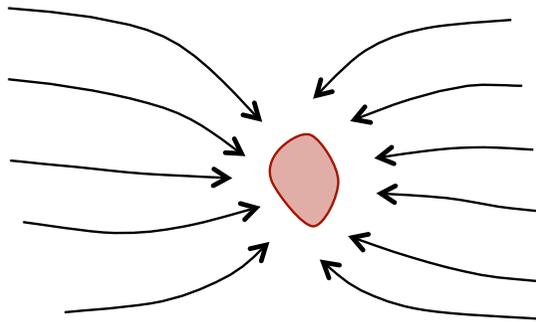
- *Sterne* bilden sich in *Molekülwolken*
- Bildung des *H<sub>2</sub> Moleküls* hängt von der *Dichte* ab
- Molekülwolken bilden sich an *Stagnationspunkten konvergenter großskaliger Strömungen*



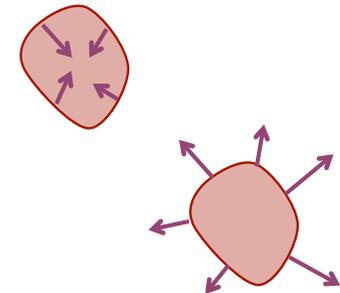
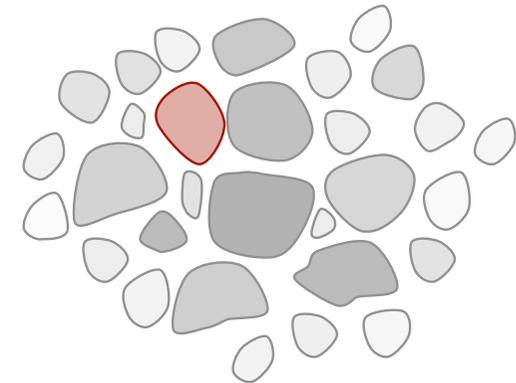
- Externe Störungen *erhöhen* lokale Wahrscheinlichkeit der Molekülwolkenbildung (z.B. in Spiralarmen oder bei Galaxienwechselwirkung, usw.)

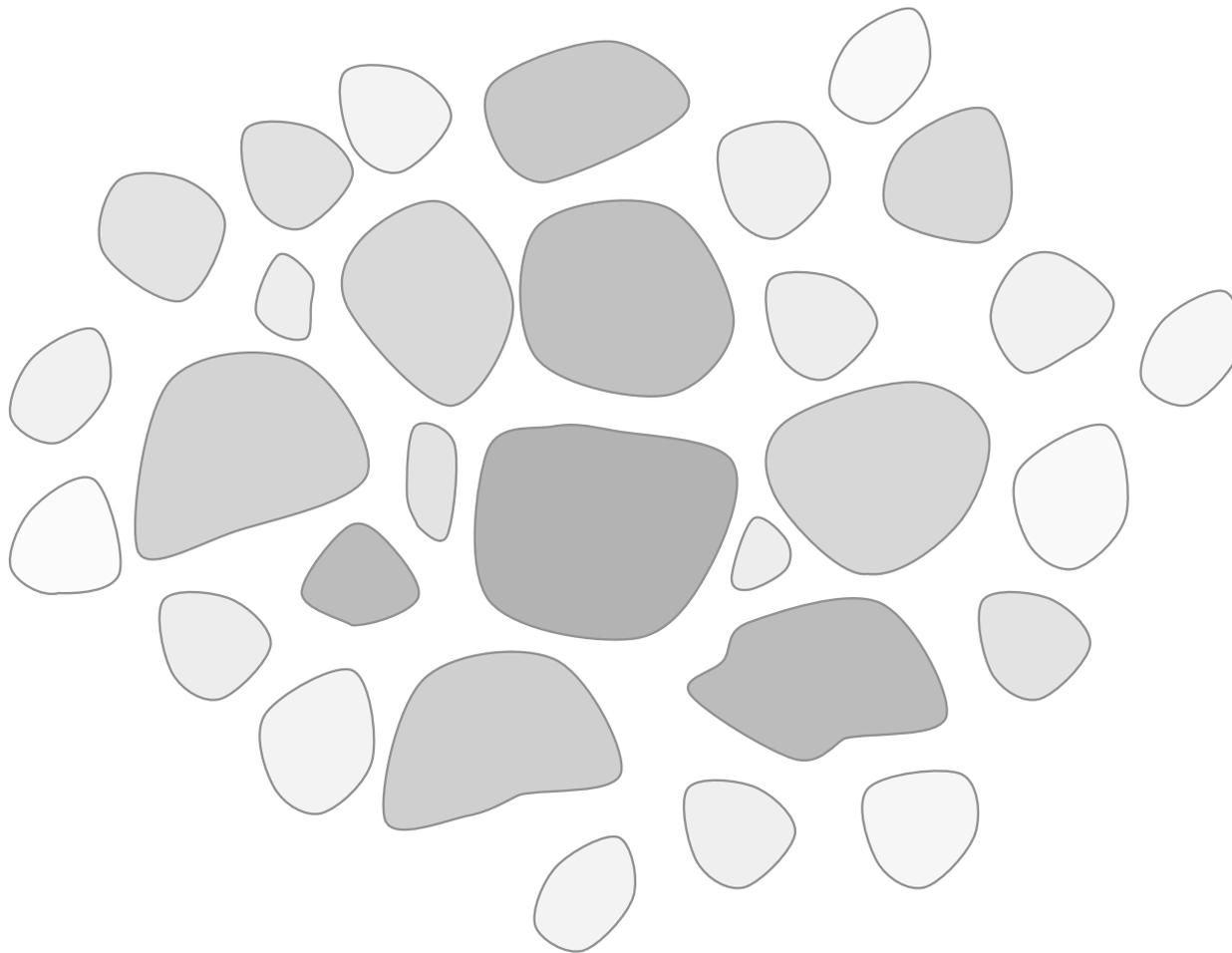
# Sternentstehung: kleine Skalen

- Prozess ist *selbstähnlich*: Was für große Skalen gilt, trifft auch auf die kleinen zu:
- Protostellare Wolkenkerne bilden sich an *Stagnationspunkten* in *konvergenten turbulenten Strömungen*

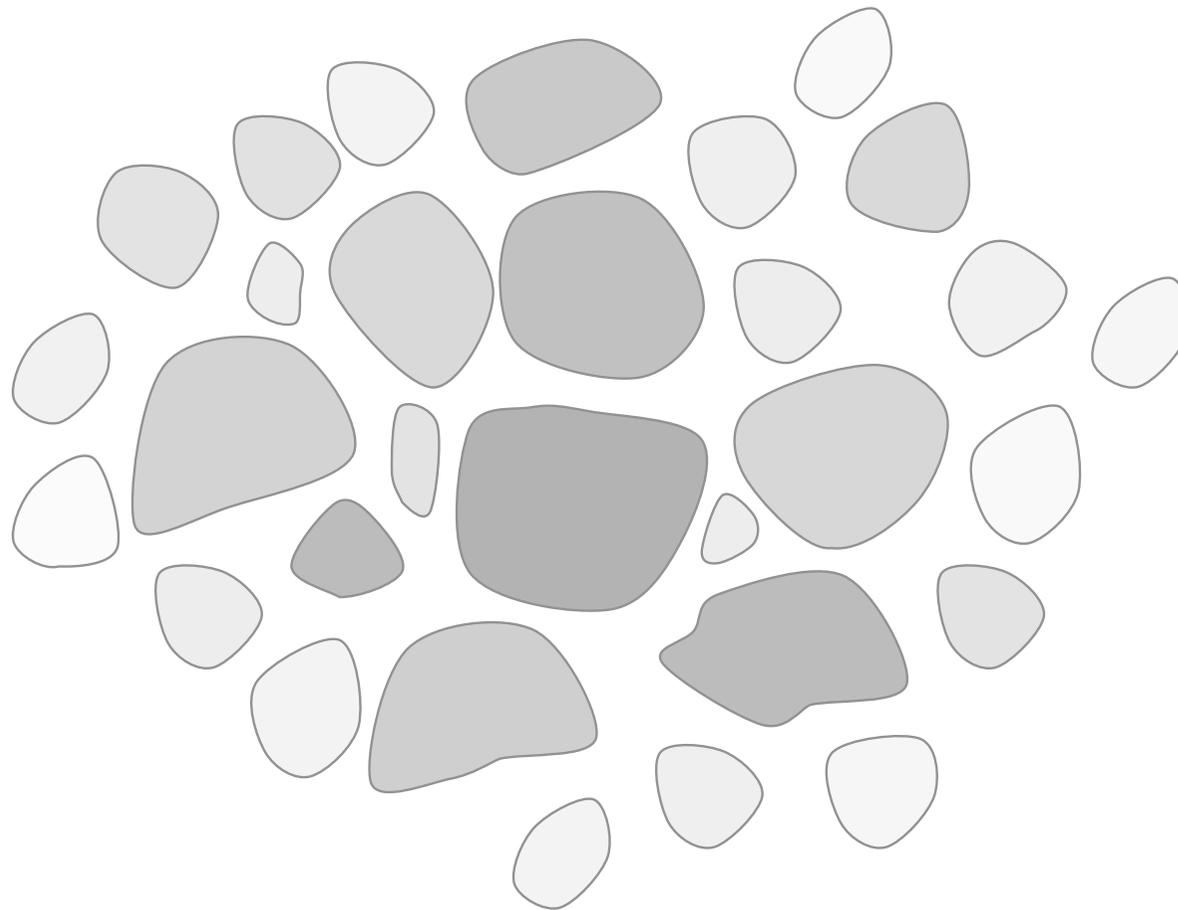


- unter bestimmten Bedingungen ( $M > M_{crit}$ ) können Wolkenkerne *kollabieren* --> *Sternbildung* (ansonsten Reexpansion)

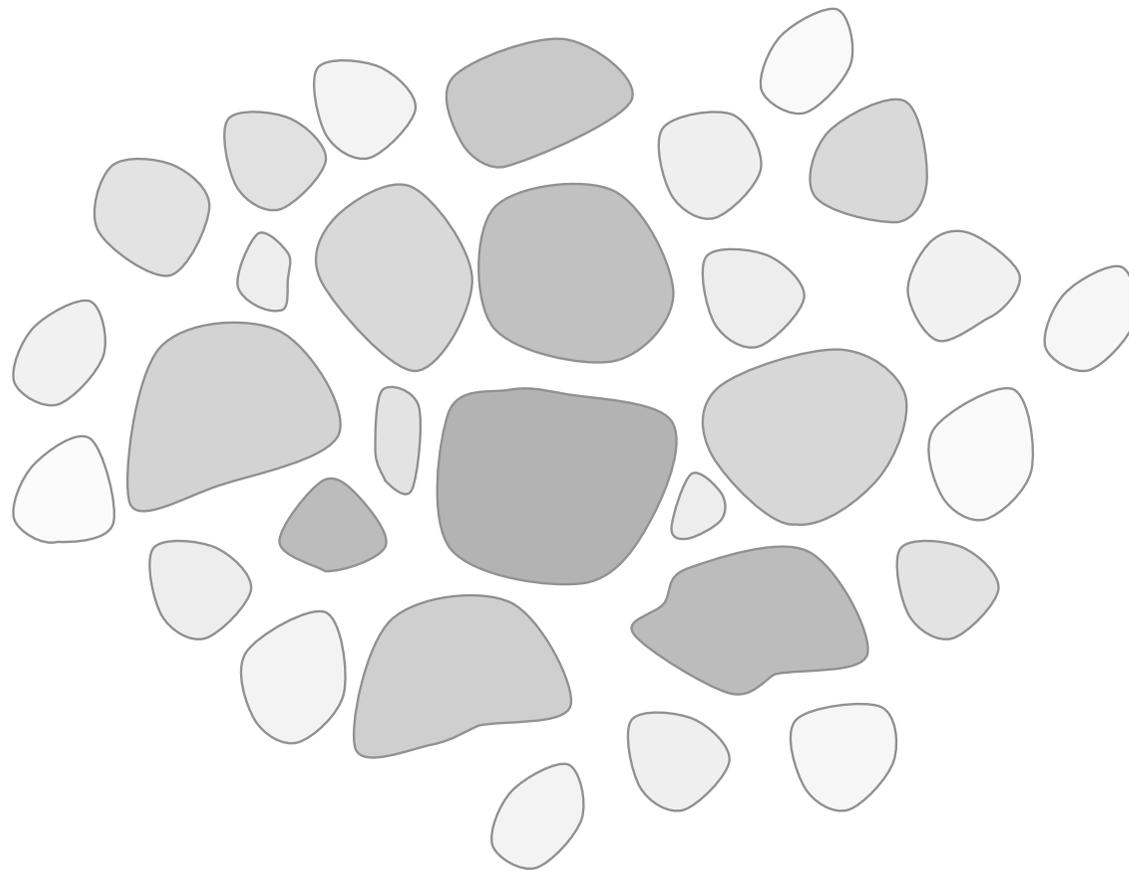




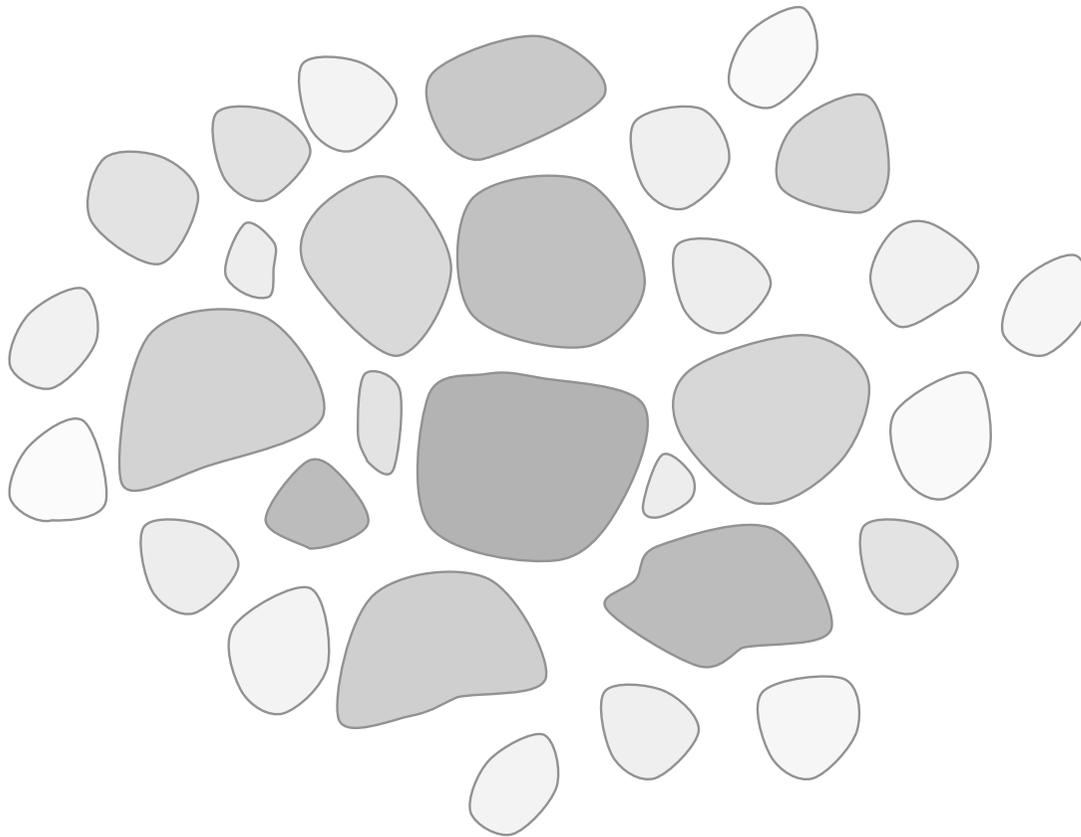
Turbulenz erzeugt Hierarchie von Klumpen



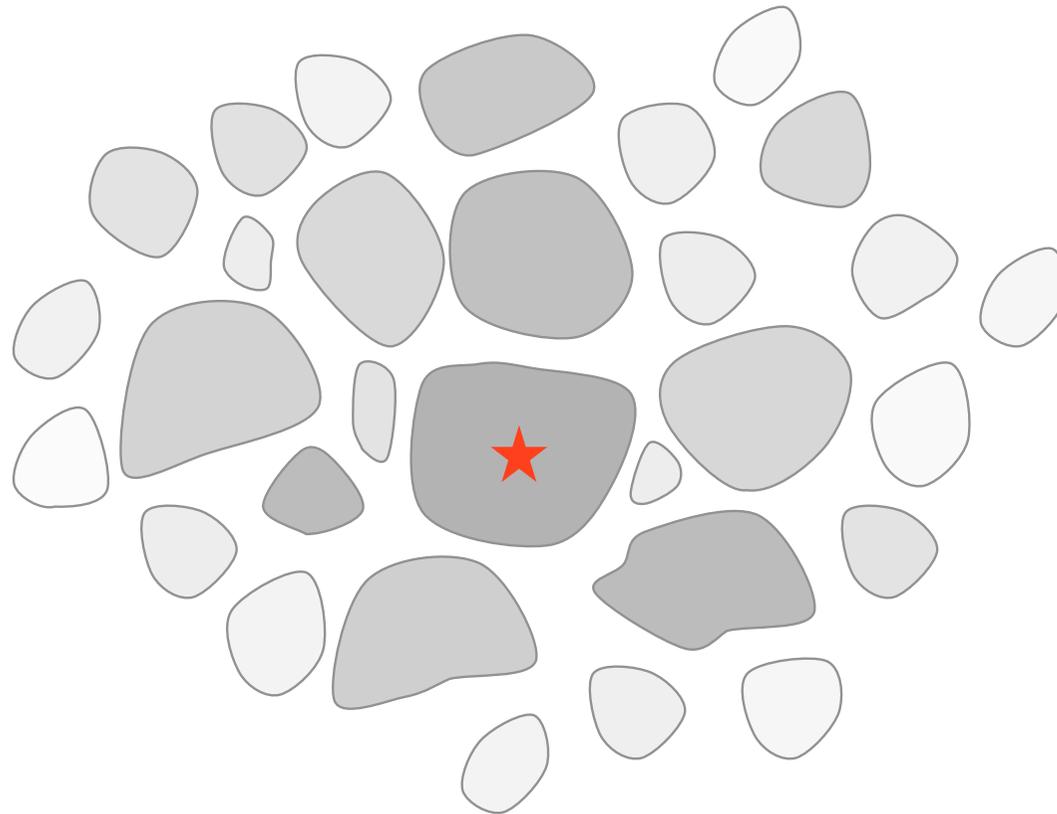
Turbulenz dissipiert, Kontraktion setzt ein



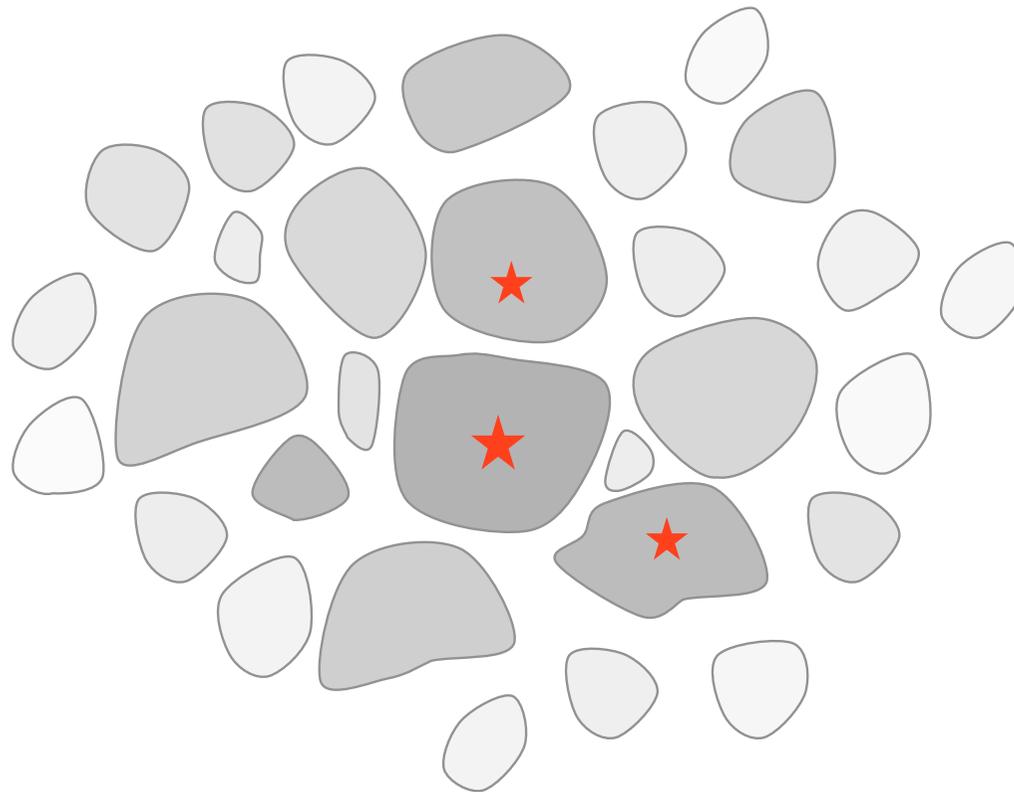
Turbulenz dissipiert, Kontraktion setzt ein



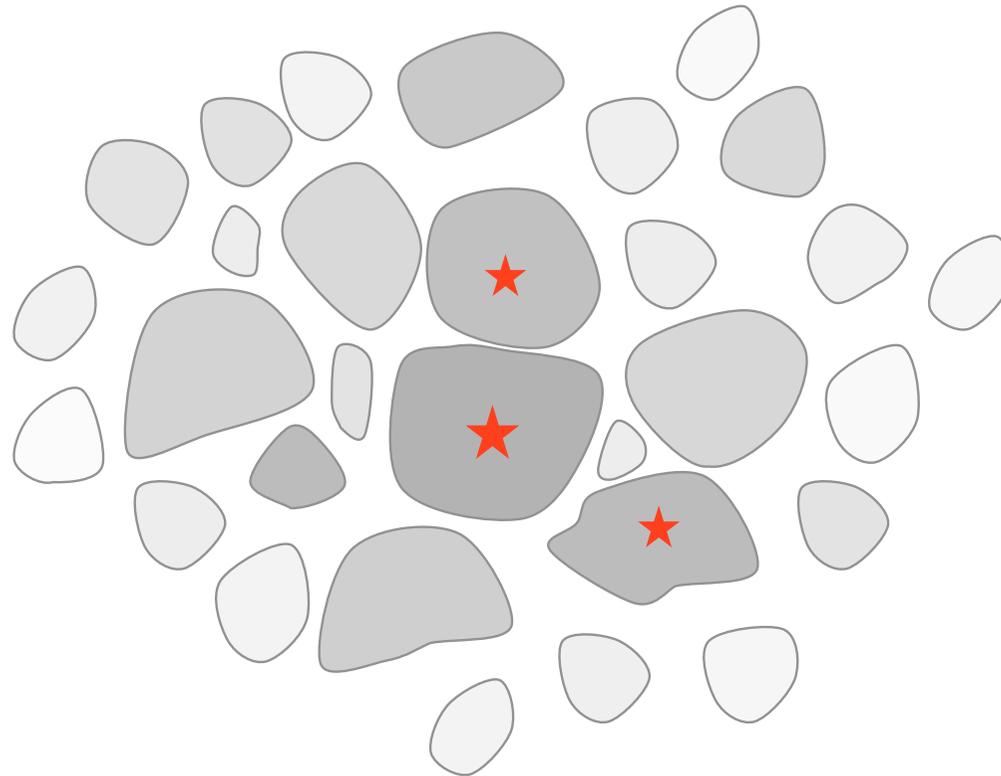
während Region kontrahiert können einzelne Klumpen kollabieren und Sterne bilden



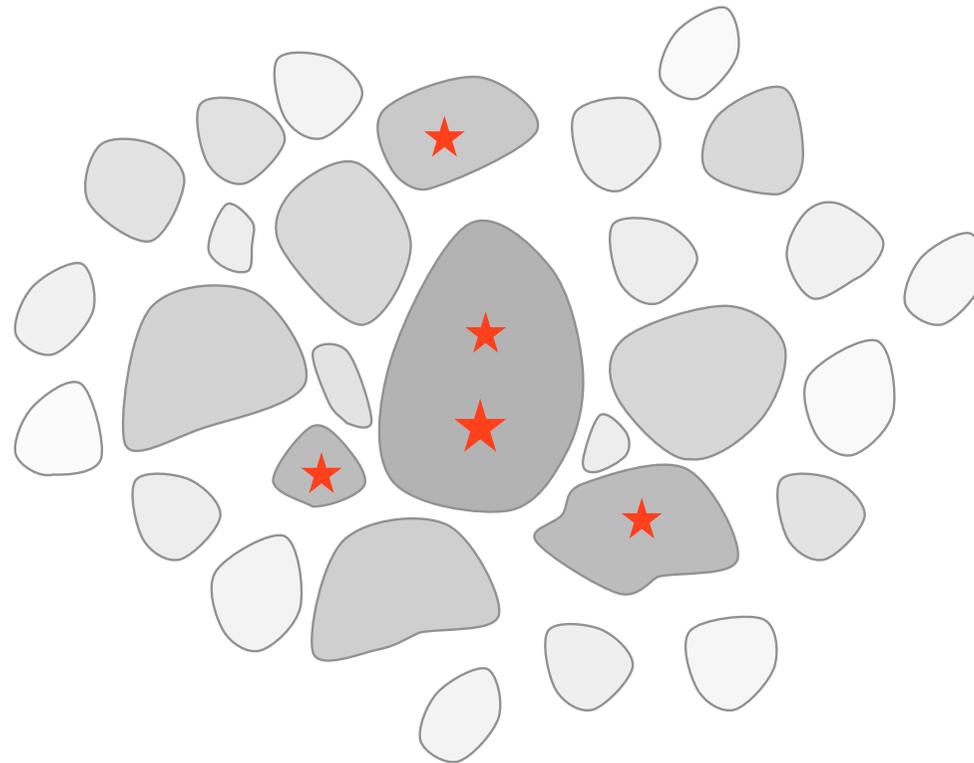
während Region kontrahiert können einzelne Klumpen kollabieren und Sterne bilden



einzelne Klumpen kollabieren und bilden Sterne

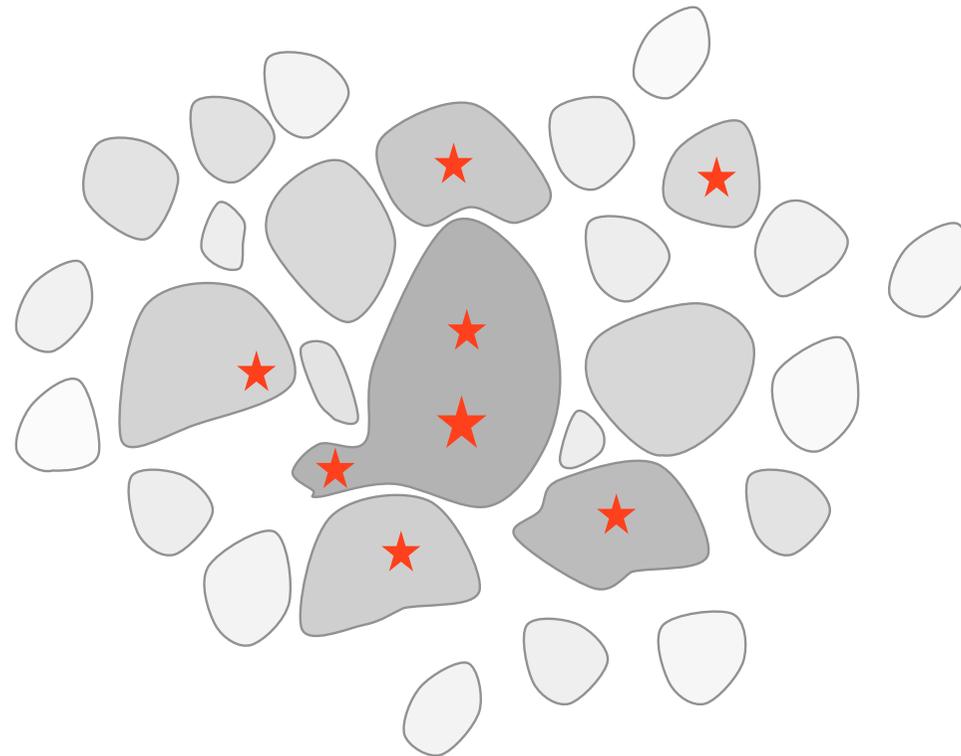


einzelne Klumpen kollabieren und bilden Sterne

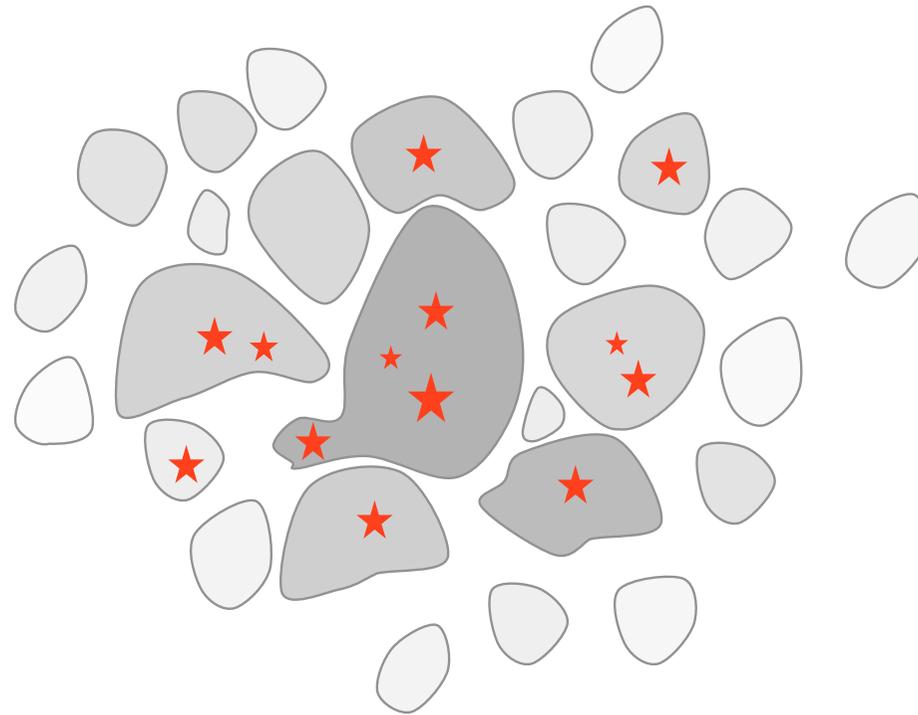


$$\alpha = E_{\text{kin}} / |E_{\text{pot}}| < 1$$

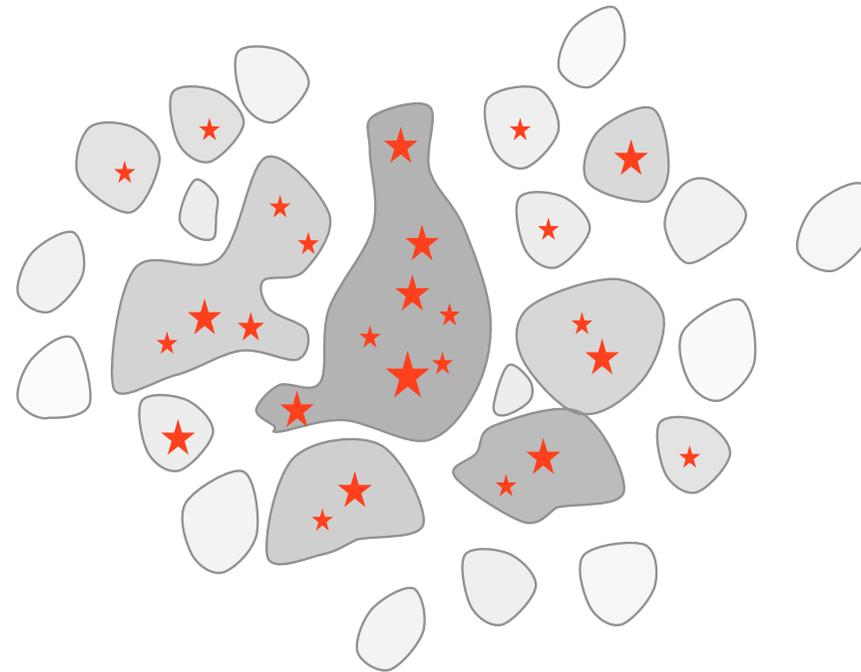
Im *dichten Haufen* können Klumpen verschmelzen während sie kollabieren --> sie enthalten nun mehrere Protosterne



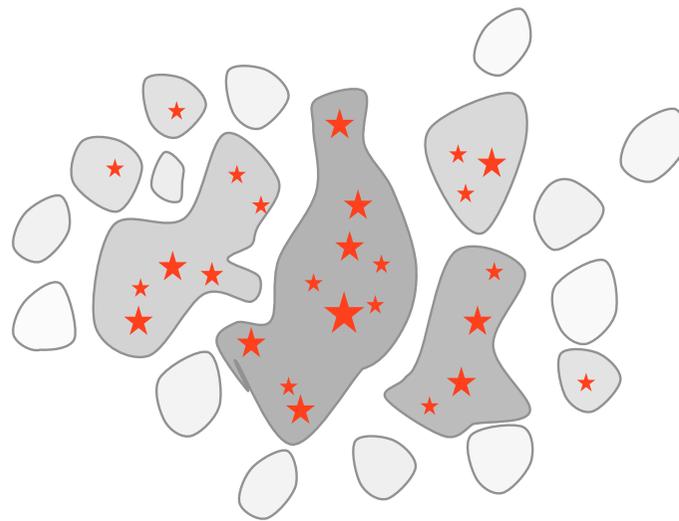
Im *dichten Haufen* können Klumpen verschmelzen während sie kollabieren --> sie enthalten nun mehrere Protosterne



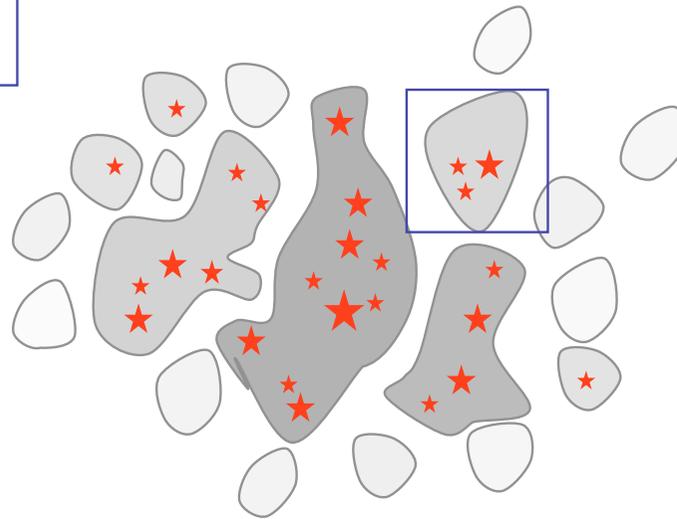
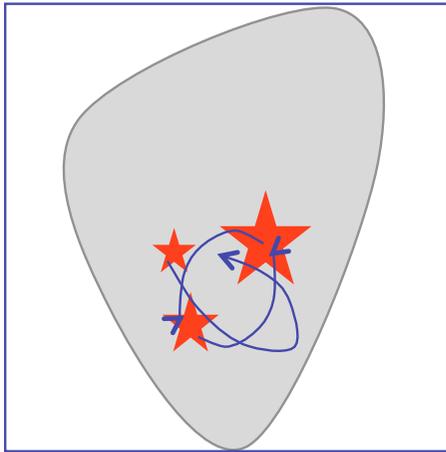
Im *dichten Haufen* können Klumpen verschmelzen während sie kollabieren --> sie enthalten nun mehrere Protosterne



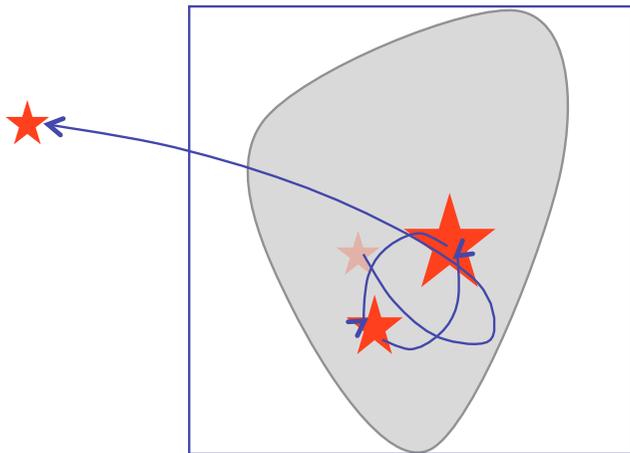
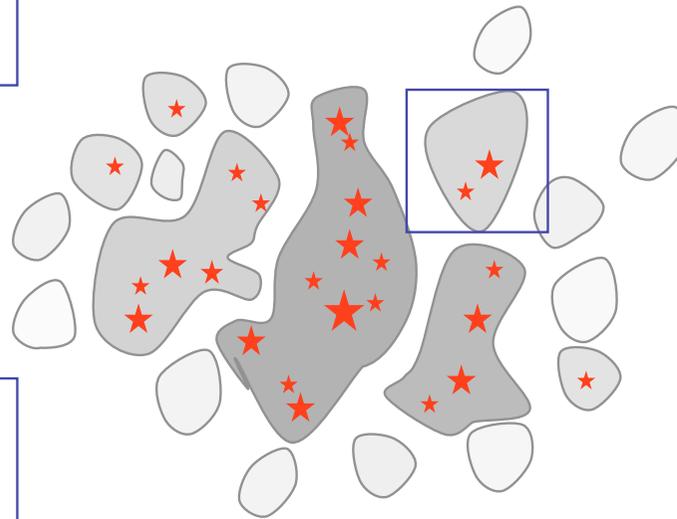
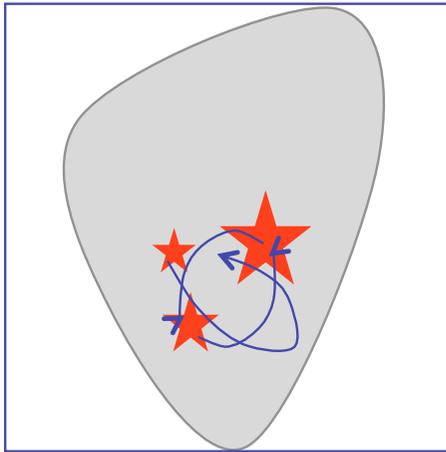
Im *dichten Haufen* wird kompetitives Wachstum wichtig



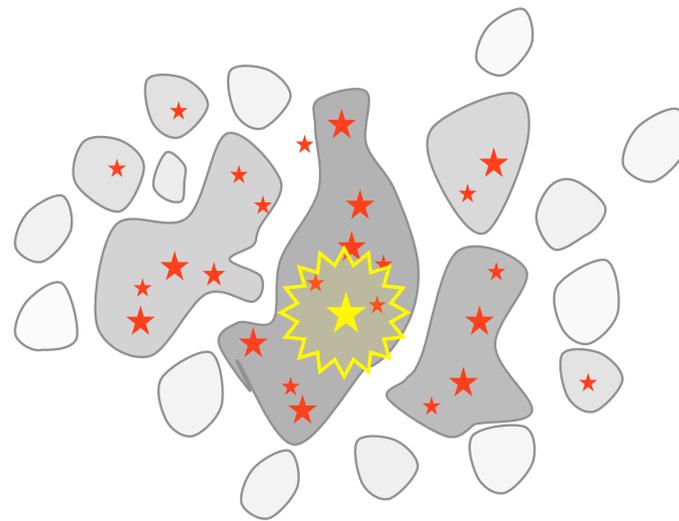
Im *dichten Haufen* wird kompetitives Wachstum wichtig



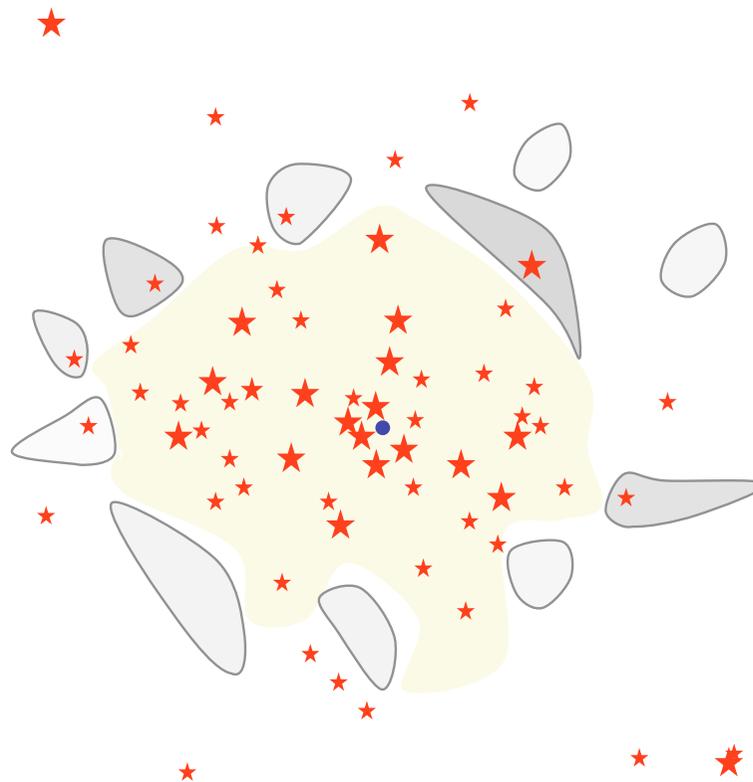
Im *dichten Haufen* beeinflussen stellardynamische Prozesse das Wachstum



massearme Objekte können herausgeschleudert werden --> Ende der Akkretion



Feedback beendet die Sternbildung

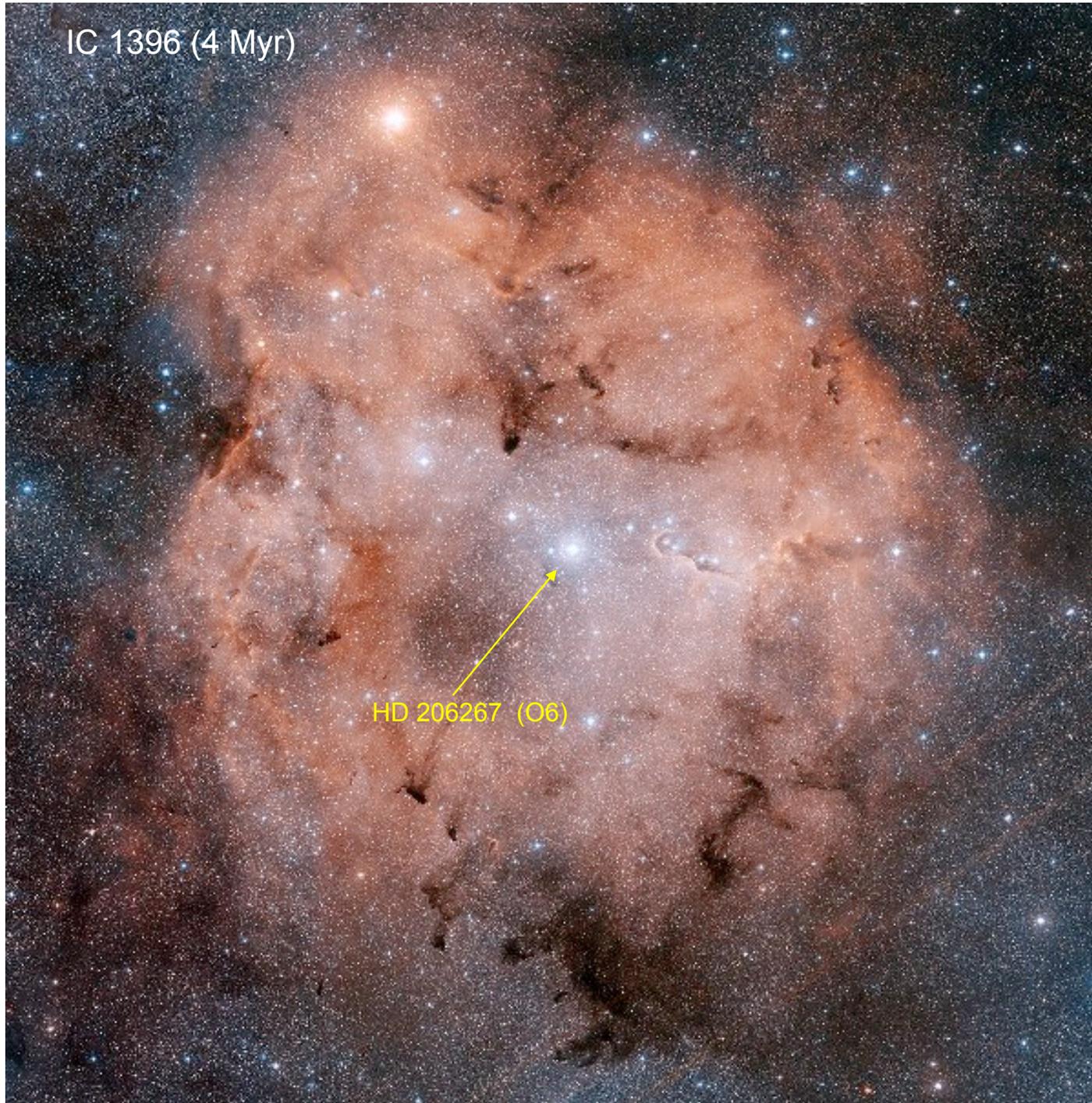


Resultat: *Sternhaufen*, evtl. umgeben von H<sub>II</sub>-Region

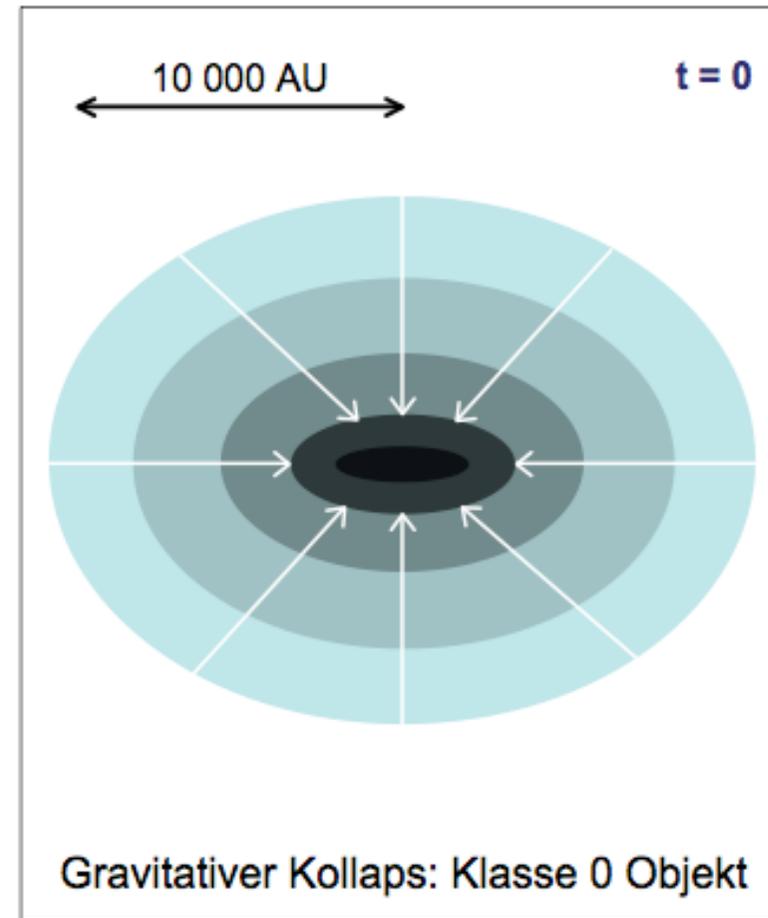
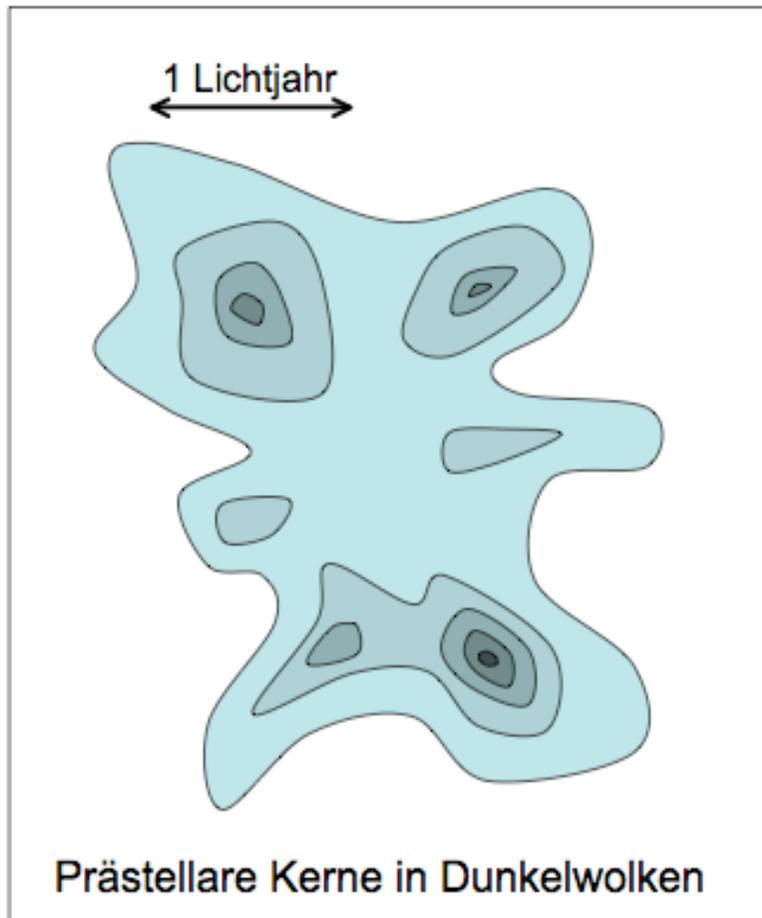
IC 1396 (4 Myr)

ein massereicher Stern

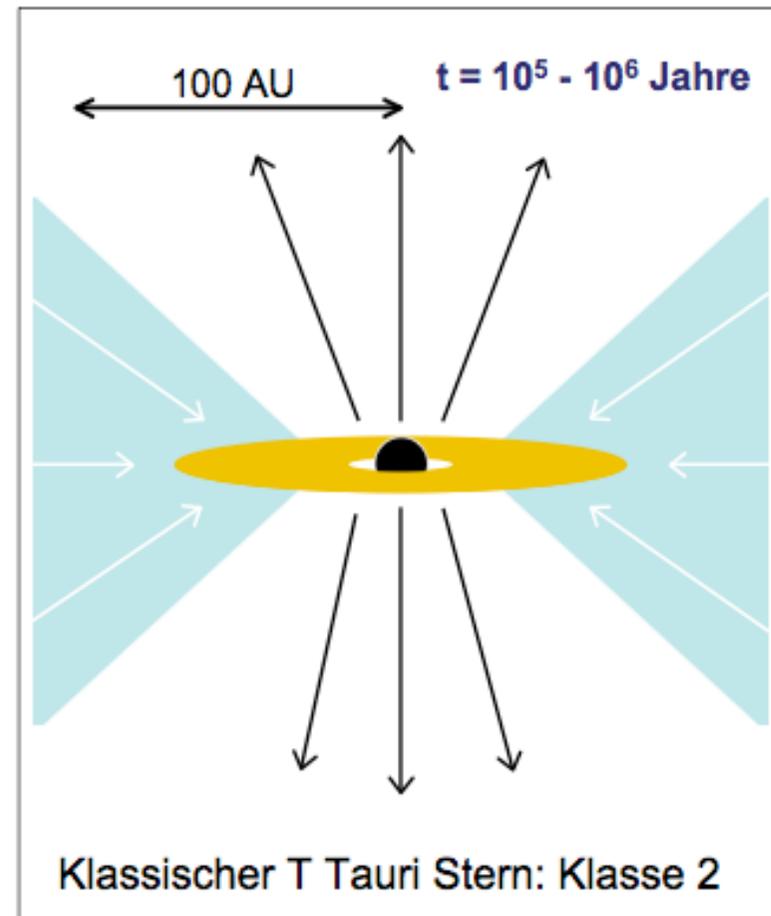
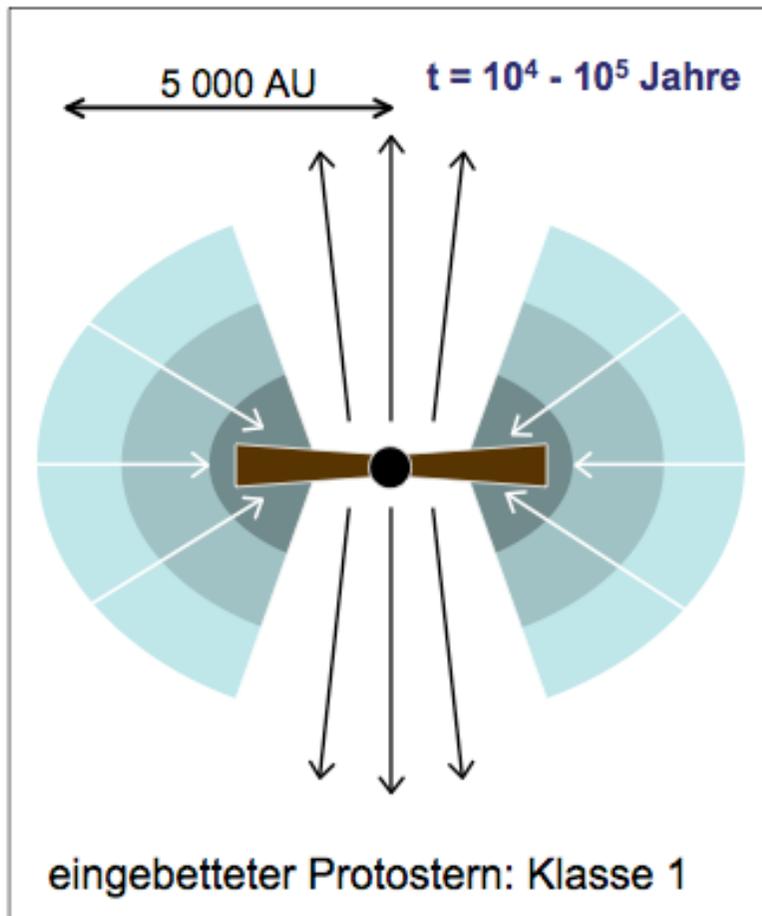
HD 206267 (O6)



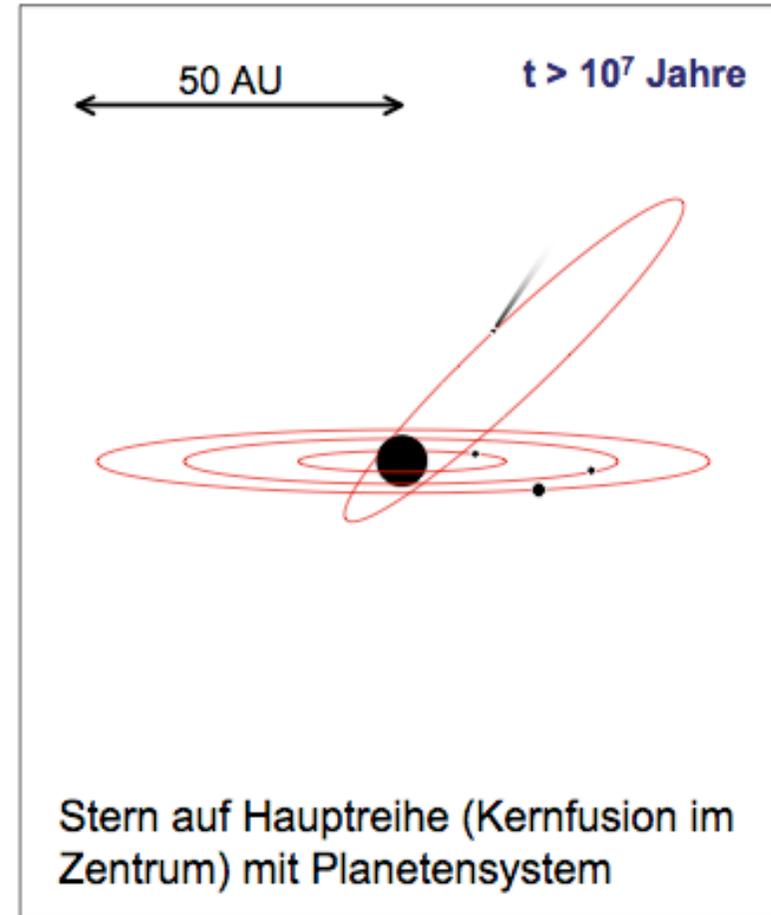
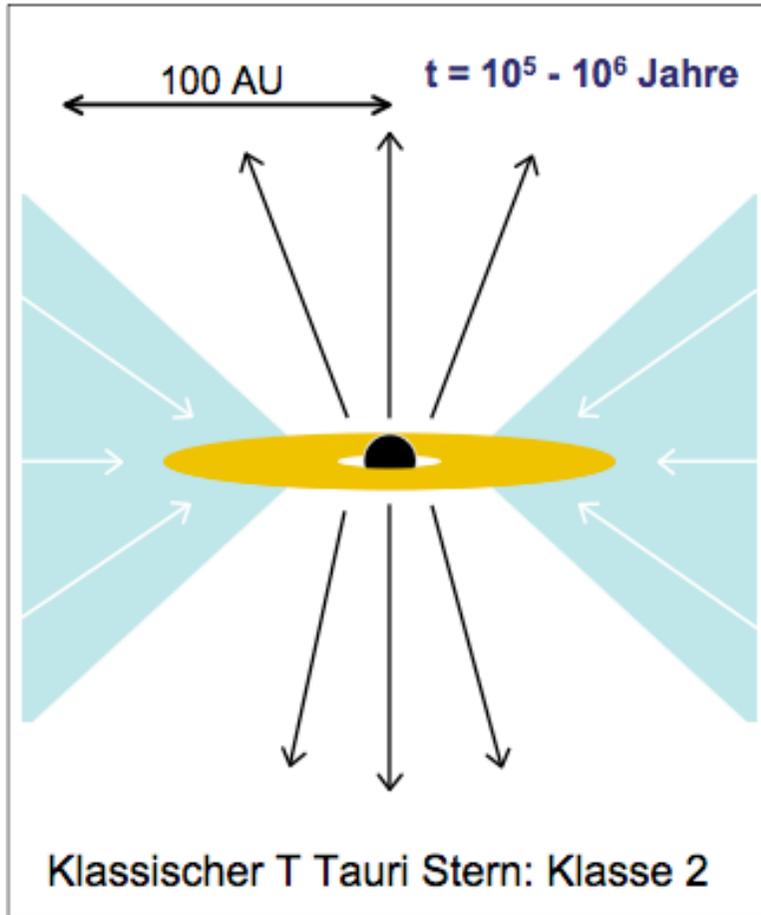
# Stadien der Sternbildung 1



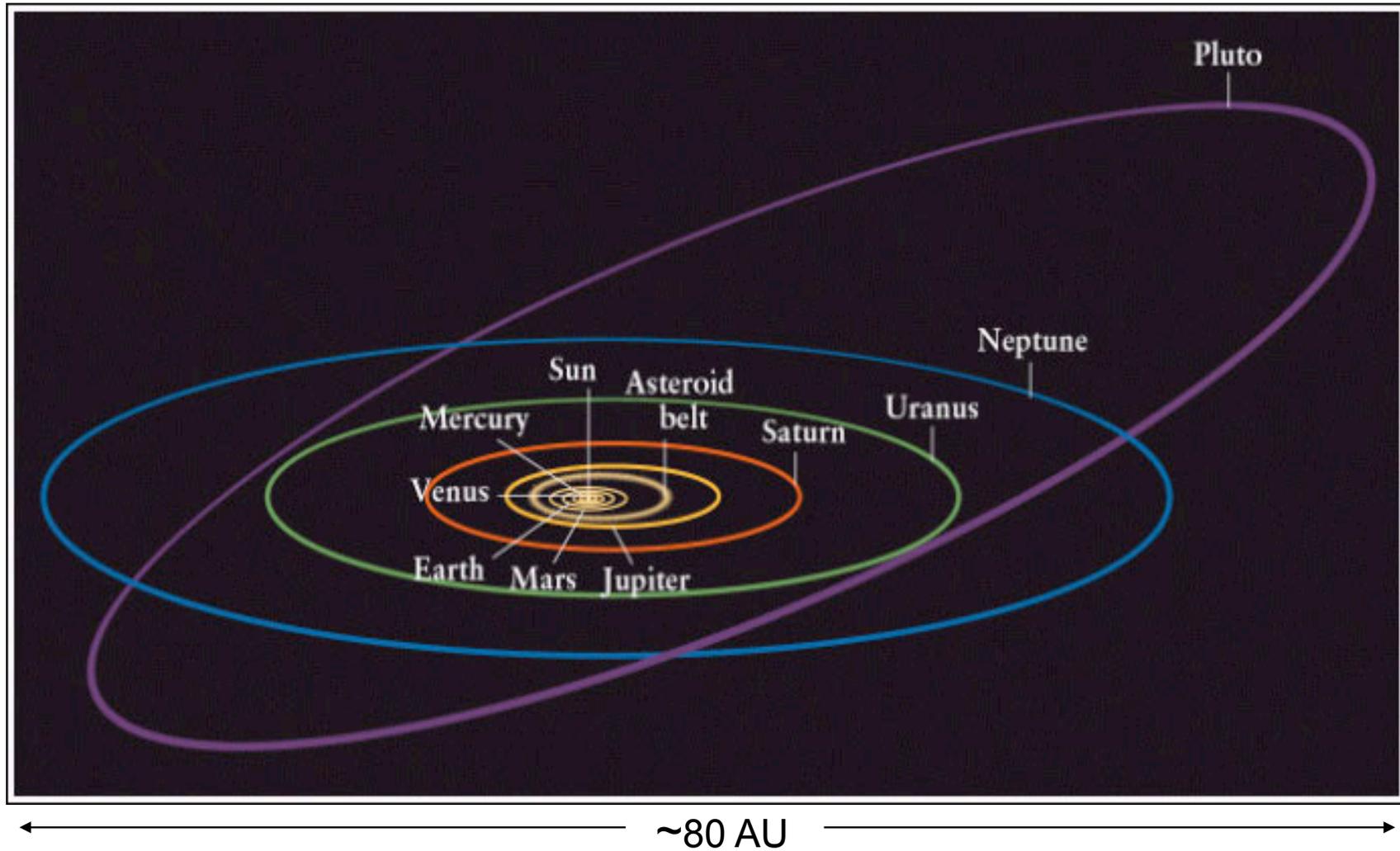
# Stadien der Sternbildung 2



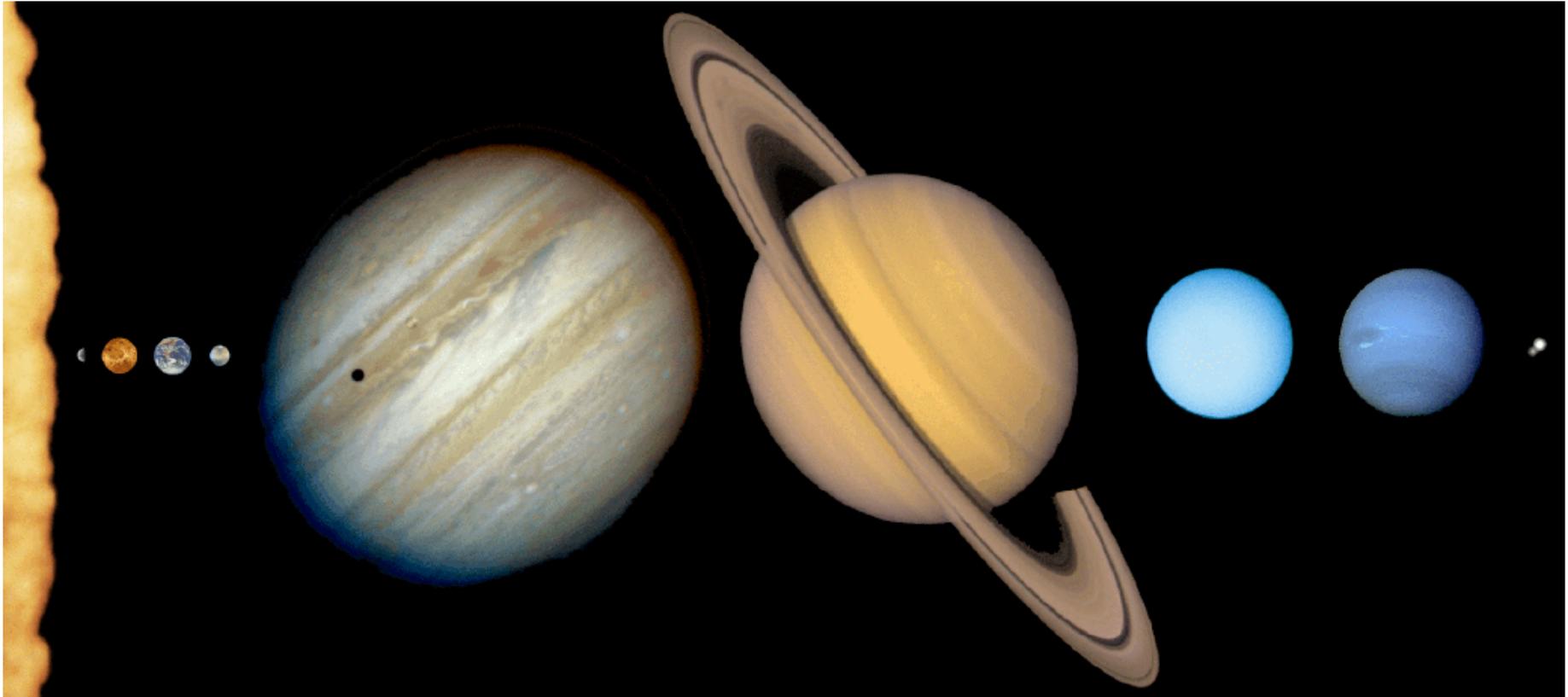
# Stadien der Sternbildung 3



# The planetary system II



# Comparison of sizes



# Zusammenfassung

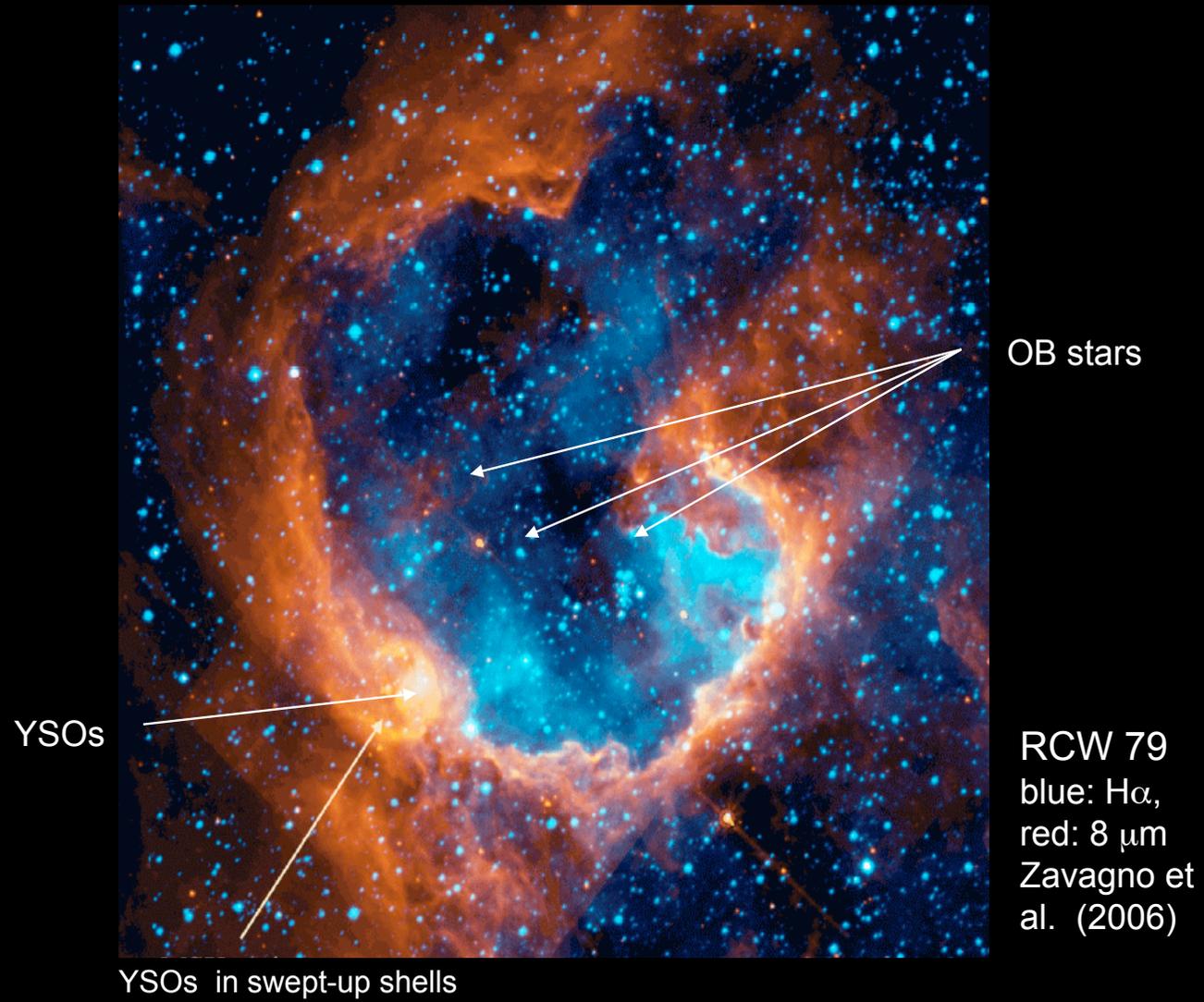
# Zusammenfassung

- Sternbildung beginnt *früh* im Universum.
- Sterne bilden sich in *Galaxien*.
- In diesen Galaxien entstehen Sterne im *Inneren* von *Wolken* aus *molekularem Wasserstoff*.
- *Dichte* und *Geschwindigkeitsstruktur* dieser Wolken ist von *Überschallturbulenz* bestimmt
- Bereiche der Wolke werden gravitativ instabil. *Schwerkraft* dominiert über *Gasdruck*, *Magnetfeld*, und *Turbulenz*.
- Im gravitativen Kollaps steigt die *Dichte* um den Faktor  $10^{20}$ , *Ausdehnung* sinkt um Faktor  $10^7$ .
- Unsere *Sonne* ist *typischer Stern*:  $M_{\odot} = 2 \times 10^{30}$  kg,  $\varnothing_{\odot} = 1,4 \times 10^7$  km,  $T_{\odot} = 5800$ K.
- *Sternmassen* variieren vom 1/10 bis 100 Sonnenmassen.

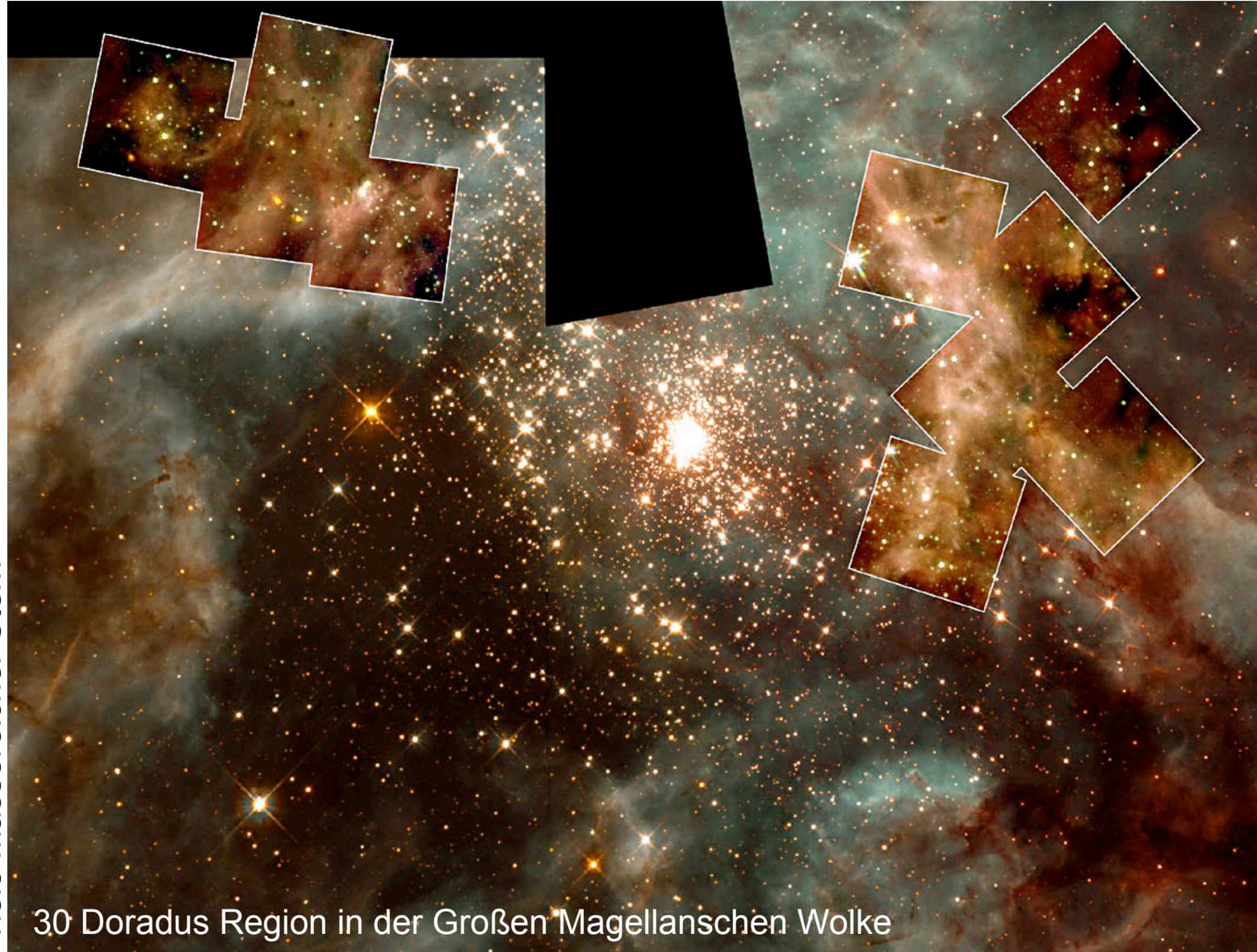
Danke!



mehrere massereicher Stern



viele massereicher Stern



30 Doradus Region in der Großen Magellanschen Wolke

alles in einem Bild

